



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

WÊNNYA JOYCE CARNEIRO RODRIGUES RAMALHO

**ANÁLISE DA CINÉTICA DE SECAGEM DA BATATA-DOCE (*Ipomea batatas L.*) POR DIFERENTES TÉCNICAS DE SECAGEM**

João Pessoa-PB  
Outubro/2018

WÊNNYA JOYCE CARNEIRO RODRIGUES RAMALHO

**ANÁLISE DA CINÉTICA DE SECAGEM DA BATATA-DOCE (*Ipomea batatas L.*) POR DIFERENTES TÉCNICAS DE SECAGEM**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Coordenação de Engenharia de  
Materiais, do Centro de Tecnologia da  
Universidade Federal da Paraíba, para  
apreciação da banca examinadora como parte  
dos requisitos necessários para a obtenção do  
grau de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Heber Sivini Ferreira

Coorientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Veruscka A. Silva

João Pessoa – PB  
Outubro/2018

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

R165a Ramalho, Wênnya Joyce Carneiro Rodrigues.

ANÁLISE DA CINÉTICA DE SECAGEM DA BATATA-DOCE (Ipomea batatas L.) POR DIFERENTES TÉCNICAS DE SECAGEM / Wênnya Joyce Carneiro Rodrigues Ramalho. - João Pessoa, 2018.  
87 f. : il.

Orientação: Heber Sivini Ferreira.

Coorientação: Veruscka Araújo Silva.

Monografia (Graduação) - UFPB/Tecnologia.

1. Batata-doce. 2. modelos matemáticos (Fick, Page e Thompson). 3. cinética de secagem. I. Ferreira, Heber Sivini. II. Silva, Veruscka Araújo. III. Título.

UFPB/BC

WÊNNYA JOYCE CARNEIRO RODRIGUES RAMALHO

**ANÁLISE DA CINÉTICA DE SECAGEM DA BATATA-DOCE (*Ipomea batatas L.*) POR DIFERENTES TÉCNICAS DE SECAGEM**

Data de defesa: 30 de outubro de 2018.

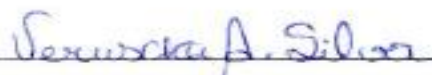
Período: 2018.1

Resultado: APROVADO

Trabalho de Conclusão de Curso Aprovado pela Banca Examinadora:



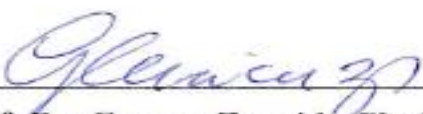
**Prof. Dr. Héber Sivini Ferreira**  
**Orientador**  
**UFPB**



**Prof. Dr.ª Veruska Araújo Silva**  
**Coorientadora**  
**UFPB**



**Prof. Dr. Ieverton Caiandre Andrade Brito**  
**DEMAT/CT/UFPB**  
**Examinador**



**Prof. Dr. Genaro Zenaide Clericuzi**  
**DEQ/CT/UFPB**  
**Examinador**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida, por ter me dado forças para superar todos os momentos difíceis pelos quais passei e por tudo o que foi conquistado até aqui.

Aos meus amados pais, José Filho e Lúcia Maria, por todo o amor e dedicação, sempre mostrando a importância dos estudos para o meu crescimento.

Aos meus irmãos, Wesley Ramalho e Ranielyson Vieira, por todo amor, cuidado e por estarem comigo nos momentos em que mais precisei.

Aos meus sobrinhos, Maria Clara e Rodrigo Henrique, por todo carinho e amor.

Ao meu namorado, Matheus Rodrigues, por toda compreensão, apoio, força e por sempre se fazer presente em minha vida.

A minha vizinha, Mirtes Ramalho, por me colocar sempre em suas orações para que eu tivesse forças o suficiente para enfrentar qualquer desafio.

A todas as minhas tias, em especial, a tia Senharinha Ramalho, Danda Léo, Nenem Ferreira, Vanda Léo, por acreditarem em mim e por todo amor durante todo o tempo.

As minhas primas, Mayéwe Elyênia, Monna Elyelma e Francinalda Santos, por toda motivação e por sempre acreditarem que eu poderia alcançar os meus objetivos.

Aos meus amigos de graduação, Ana Beatriz, Italo Sousa e Nelson Xavier, por todos os momentos de estudos, de diversão, alegria e sobretudo, por todo companheirismo.

Ao meu orientador, Héber Sivini, por toda orientação, disponibilidade, paciência, por todas as oportunidades que me deu desde o período do PROBEX e por todos os conselhos que levarei para a vida.

A coorientadora, Veruscka Araújo, por sua orientação ao longo deste trabalho, por compartilhar o seu conhecimento e experiência, com dedicação e carinho.

Aos professores, Ieverton Caiandre e Genaro Clericuzi, por fazerem parte da banca, contribuindo com sugestões para enriquecer este trabalho.

A todos os professores do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMat), por toda contribuição dada ao longo do curso.

## RESUMO

As raízes e tubérculos tropicais são fontes importantes de alimentos ricos em energia para a nutrição humana e podem desempenhar um papel importante no contexto de desenvolvimento sustentável, como uma fonte independente de energia e nutriente. A secagem apresenta uma alternativa tecnológica de redução das perdas pós colheita de frutos e hortaliças. Esta pesquisa foi desenvolvida com o propósito de avaliar a cinética de secagem da batata-doce (*Ipomea batatas L.*). O processo de secagem foi conduzido em estufa de convecção, estufa de circulação, *refractance window*, micro-ondas e termogravimetria (TG), submetidas a temperaturas de 60, 65 e 70 °C e potência de 1008,04 W, 1147,08 W e 1320,88 W, para secagem em micro-ondas. Para ajuste matemático dos dados experimentais, foram aplicados modelos matemáticos de Fick, Page e Thompson. Além disso, foram aplicados modelos de Lozano e Ratti para estudo do encolhimento. As magnitudes dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) foram usadas para analisar o grau de ajuste dos modelos. Os resultados obtidos revelaram que a estufa de circulação a 70 °C apresentou o melhor ajuste, exibindo coeficientes de determinação ( $R^2$ ) elevados para todos os modelos matemáticos, sendo, portanto, superiores a 99 %, para os modelos de Fick, Page e Thompson. Para o modelo matemático de Ratti aplicado ao estudo do encolhimento o  $R^2$  foi também superior a 99 %. Em relação ao modelo matemático, o modelo de Page foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais. Observou-se que o aumento da temperatura diminui o tempo de secagem, e com isso, o micro-ondas exibiu o menor tempo para atingir o equilíbrio, sendo especificamente 2,5, 2,33 e 2,16 minutos para as potências de 1008,04 W, 1147,08 W e 1320,88 W, respectivamente. A difusividade efetiva, calculada a partir da lei de Fick, aumentou com a elevação da temperatura, considerando ou não o encolhimento.

**Palavras chaves:** Batata-doce, modelos matemáticos (Fick, Page e Thompson), cinética de secagem.

## ABSTRACT

Tropical roots and tubers are important sources of energy-rich food for human nutrition and can play an important role in the context of sustainable development as an independent source of energy and nutrient. Drying presents a technological alternative to reduce post harvest losses of fruits and vegetables. This research was developed with the purpose of evaluating the drying kinetics of sweet potato (*Ipomea batatas* L.). The drying process was conducted in a convection oven, circulating oven, refractance window, microwave and thermogravimetry (TG), subjected to temperatures of 60, 65 and 70 ° C and power of 1008,04 W, 1147,08 W and 1320,88 W, for microwave drying. For mathematical adjustment of the experimental data, mathematical models of Fick, Page and Thompson were applied. In addition, Lozano and Ratti models were applied to study the shrinkage. The magnitudes of the determination coefficients (R<sup>2</sup>) were used to analyze the degree of fit of the models. The results showed that the circulation oven at 70 ° C presented the best fit, showing high determination coefficients (R<sup>2</sup>) for all the mathematical models, being therefore higher than 99%, for the models of Fick, Page and Thompson. For Ratti's mathematical model applied to the study of shrinkage R<sup>2</sup> was also higher than 99%. In relation to the mathematical model, the Page model was the one that best fit the experimental data. It was observed that the increase of the temperature decreases the drying time, and with this, the microwave showed the shortest time to reach the balance, being specifically 2.5, 2.33 and 2.16 minutes for the powers of 1008,04 W, 1147,08 W and 1320,88 W, respectively. The effective diffusivity, calculated from the law of Fick, increased with the elevation of the temperature, considering or not the shrinkage.

**Keywords:** Sweet potato, mathematical models (Fick, Page, Thompson and Ratti), drying kinetics.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquematização da transferência de calor e massa.....	23
Figura 2 - Curvas típicas do processo de secagem .....	28
Figura 3– Ilustração da batata-doce.....	40
Figura 4 - Coordenadas aferidas para a obtenção dos volumes das amostras, sendo L a espessura da fatia e A, B, C, D e E os diâmetros aferidos.....	44
Figura 5 - Razão de umidade em função do tempo para secagem da batata doce em estufa de convecção empregando o modelo matemático de Fick nas temperaturas de 60, 65 e 70 °C. ..	77
Figura 6 - Razão de umidade em função do tempo para secagem da batata doce em estufa de circulação empregando o modelo matemático de Page nas temperaturas de 60, 65 e 70 °C. ..	77
Figura 7 - Razão de umidade em função do tempo para secagem da batata doce em refractance window empregando o modelo matemático de Fick nas temperaturas de 60, 65 e 70 °C.....	78
Figura 8 - Razão de umidade em função do tempo para secagem da batata doce em micro-ondas empregando o modelo matemático de Fick nas potências de 1008, 04, 1147,08 e 1320, 88 W. ....	78
Figura 9- Razão de umidade em função do tempo para secagem da batata doce em TG empregando o modelo matemático de Fick nas temperaturas de 60, 65 e 70 °C.....	79
Figura 10- Razão de umidade em função do tempo para secagem da batata doce em estufa de convecção empregando o modelo matemático de Page nas temperaturas de 60, 65 e 70 °C...	79



Figura 11 - Razão de umidade em função do tempo para secagem da batata doce em estufa de circulação empregando o modelo matemático de Page nas temperaturas de 60, 65 e 70 °C...80

Figura 12 - Razão de umidade em função do tempo para secagem da batata doce em refractance window empregando o modelo matemático de Page nas temperaturas de 60, 65 e 70 °C.....80

Figura 13- Razão de umidade em função do tempo para secagem da batata doce em micro-ondas empregando o modelo matemático de Page nas potências de 1008, 04, 1147,08 e 1320, 88 W. ....81

Figura 14- Razão de umidade em função do tempo para secagem da batata doce em TG empregando o modelo matemático de Page para secagem nas temperaturas de 60, 65 e 70 °C. ....81

Figura 15 - Razão de umidade em função do tempo para secagem da batata doce em estufa de convecção empregando o modelo matemático de Thompson nas temperaturas de 60, 65 e 70 °C.....82

Figura 16 - Razão de umidade em função do tempo para secagem da batata doce em estufa de circulação empregando o modelo matemático de Thompson nas temperaturas de 60, 65 e 70 °C.....82

Figura 17 - Razão de umidade em função do tempo para secagem da batata doce em refractance window empregando o modelo matemático de Thompson nas temperaturas de 60, 65 e 70 °C. ....83

Figura 18 - Razão de umidade em função do tempo para secagem da batata doce em micro-ondas empregando o modelo matemático de Thompson nas potências de 1008, 04, 1147,08 e 1320, 88 W. ....83

Figura 19- Razão de umidade em função do tempo da secagem da batata doce em TG empregando o modelo matemático de Thompson nas temperaturas de 60, 65 e 70 °C.....84

Figura 20- Encolhimento em função da razão de umidade (RU) para a batata doce aplicando o modelo de Lozano em estufa de convecção nas temperaturas de 60, 65 e 70 °C. ....	84
Figura 21- Encolhimento em função da razão de umidade (RU) para a batata doce aplicando o modelo de Lozano em estufa de circulação nas temperaturas de 60, 65 e 70 °C. ....	85
Figura 22- Encolhimento em função da razão de umidade (RU) para a batata doce aplicando o modelo de Lozano em refractance window nas temperaturas de 60, 65 e 70 °C. ....	85
Figura 23 - Encolhimento em função da razão de umidade (RU) para a batata doce aplicando o modelo de Lozano em micro-ondas nas potências de 1008, 04, 1147,08 e 1320, 88 W. ....	86
Figura 24 - Encolhimento em função da razão de umidade (RU) para a batata doce aplicando o modelo de Lozano em termogravimetria (TG) nas temperaturas de 60, 65 e 70 °C. ....	86
Figura 25 - Encolhimento em função da razão de umidade (RU) para a batata doce aplicando o modelo de Ratti em estufa de convecção nas temperaturas de 60, 65 e 70 °C. ....	87
Figura 26 - Encolhimento em função da razão de umidade (RU) para a batata doce aplicando o modelo de Ratti em estufa de circulação nas temperaturas de 60, 65 e 70 °C. ....	87
Figura 27 - Encolhimento em função da razão de umidade (RU) para a batata doce aplicando o modelo de Ratti em refractance window nas temperaturas de 60, 65 e 70 °C. ....	88
Figura 28 - Encolhimento em função da razão de umidade (RU) para a batata doce aplicando o modelo de Ratti em micro-ondas nas potências de 1008, 04, 1147,08 e 1320, 88 W. ....	88
Figura 29 - Encolhimento em função da razão de umidade (RU) para a batata doce aplicando o modelo de Ratti em termogravimetria (TG) nas temperaturas de 60, 65 e 70 °C. ....	89

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Área, produção e produtividade da batata doce nas regiões brasileiras .....	18
Tabela 2- Composição físico-química e nutricional da <i>Ipomoea batatas</i> . ....	19
Tabela 3- Coeficientes de difusão efetiva ( $D_{ef}$ ) e de determinação ( $R^2$ ) calculados para a verificação de ajuste dos modelos matemáticos ajustados aos valores experimentais obtidos nas temperaturas de 60 °C, 65 °C e 70 °C e nas potências 1008, 04, 1147,08 e 1320, 88 W. .	45
Tabela 4 - Tempo total de secagem exibido por cada técnica nas temperaturas de 60 °C, 65 °C e 70 °C e nas potências 1008, 04, 1147,08 e 1320, 88 W. ....	48
Tabela 5 - Valores dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) calculados para a verificação de ajuste do modelo matemático de Page aos valores experimentais obtidos nas secagens sob temperaturas de 60, 65 e 70 °C e potências de 1008, 04, 1147,08 e 1320, 88 W para as diferentes técnicas de secagens.....	49
Tabela 6- Valores dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) calculados para a verificação de ajuste do modelo matemático de Thompson aos valores experimentais obtidos nas secagens sob temperaturas de 60, 65 e 70 °C e potências de 1008,04, 1147,08 e 1320,88 W, para as diferentes técnicas de secagens.....	52
Tabela 7 - Valores dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ), calculados para a verificação do ajuste do modelo matemático de Lozano para as diferentes técnicas de secagem sob temperaturas de 60, 65 e 70 °C e potências de 1008, 04, 1147,08 e 1320, 88 W.....	54
Tabela 8- Valores dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ), calculados para a verificação do ajuste do modelo matemático de Ratti para as diferentes técnicas de secagem sob temperaturas de 60, 65 e 70 °C e potências de 1008, 04, 1147,08 e 1320, 88 W. ....	55

## SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO .....	14
2.OBJETIVOS.....	16
2.1. Objetivo Geral .....	16
2.2. Objetivos Específicos .....	16
3.FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	17
3.1. Batata doce .....	17
3.1.1.Histórico da batata doce .....	17
3.1.2.Importância socioeconômica .....	18
3.1.3.Importância nutricional .....	19
3.1.4.Teor de água .....	20
3.2. Secagem.....	22
3.2.1.Processo de secagem .....	22
3.2.2. Técnicas de secagem.....	23
3.2.3.Cinética de secagem .....	25
3.3. Modelos matemáticos .....	29
3.3.1.Modelos teóricos .....	30
3.3.1.1.Modelo de Page .....	35
3.3.1.2.Modelo de Thompson .....	36
3.3.1.3.Encolhimento .....	37
4.METODOLOGIA.....	39
4.1. Matéria-prima .....	40
4.1.1.Obtenção e seleção da matéria-prima.....	40
4.1.2.Higienização, descascamento e fatiamento .....	40
4.2. Métodos .....	41
4.2.1.Secagem.....	41
4.2.1.1.Secagem por Estufa de Convecção .....	41
4.2.1.2.Secagem por Estufa com Circulação Forçada .....	41
4.2.1.3.Secagem por Refractance Window .....	42
4.2.1.4.Secagem por Micro-ondas .....	42
4.2.1.5.Secagem por Análise Termogravimétrica (TGA).....	43
4.2.2.Ajuste por modelos matemáticos .....	43
4.2.3.Encolhimentos .....	44
5.RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	45
5.1. Modelagem da cinética de secagem .....	45
5.1.1.Modelo de Fick.....	45
5.1.2.Modelo de Page .....	49

5.1.3. Modelo de Thompson.....	51
5.1.4. Encolhimento.....	53
REFERÊNCIAS .....	59

## 1. INTRODUÇÃO

Nas últimas duas décadas, a busca por produtos naturais, saudáveis e à base de frutas tem evoluído velozmente, principalmente quando utilizados na forma de ingredientes a serem incluídos em alimentos mais elaborados, como sorvetes, cereais, laticínios, produtos de confeitaria e panificação (TORREGGIANI & BERTOLO, 2001). Wynn et al. (2010), aborda que o frequente consumo de frutas e hortaliças protege as células de danos oxidativos, além de inibir o processo de síntese de substâncias inflamatórias. Estes alimentos são ricos em fibras e possuem baixa densidade energética, de maneira que, quando ingeridos aumentam a sensação de saciedade (BARRETO et al., 2005).

De acordo com Miranda et al. (1987), a batata-doce (*Ipomea batatas L.*) é caracterizada como sendo uma planta dicotiledônea, pertencente à família Convolvulaceae, vastamente cultivada no Brasil, principalmente nas regiões Sul e Sudeste.

Devido à presença em grandes quantidades de carboidratos, fibras, minerais, vitaminas e antioxidantes, a batata-doce é bastante empregada nas alimentações saudáveis (WOOLFE, 1992). Tudor (2012), relata que um dos motivos pelo qual a batata-doce é largamente recomendada se dá principalmente ao baixo teor de índice glicêmico dos carboidratos presentes, de modo que a absorção é mais lenta pelo organismo animal e com isso, a glicose é liberada gradualmente na corrente sanguínea.

Assim como outras raízes tuberosas, a batata-doce apresenta alto teor de umidade. Deste modo, a secagem enquadra-se como uma alternativa viável para garantir a qualidade do produto e assim, aumentar o tempo de prateleira deste alimento.

O processo de secagem caracteriza-se como uma técnica bastante utilizada na conservação de alimentos. Essa técnica consiste na diminuição do teor de água presente no alimento com a finalidade de impedir o desenvolvimento de microrganismos e reações bioquímicas deteriorativas. Tem como benefício por se tratar de uma simples técnica e permitir um maior tempo de estoque/prateleira, além de possuir custos e volumes menores de acondicionamento, armazenagem e transporte. A desidratação apresenta em alguns casos, uma vantagem adicional de permitir a comercialização de uma variedade de produtos alimentícios fora do período de safra, como no caso, das frutas secas (PARK et al., 2002). A grande variedade de alimentos desidratados (misturas, sopas, frutas, verduras, entre outros) e a

crescente preocupação em reunir as especificações de qualidade e de energia, enfatizam a necessidade de um completo entendimento da operação de secagem (VAGENAS et al., 1990).

De maneira geral, a secagem é uma operação na qual calor é fornecido a um dado material que contém água, a fim de se vaporizar certo conteúdo de água deste material, obtendo-se, portanto, um produto sólido seco. O processo de secagem baseia-se essencialmente no transporte simultâneo de calor e massa, seguido de mudança de fase (BARBANTI; MASTROCOLA; SEVERINI, 1994; LEWICKI; JAKUBCZYK, 2004). O procedimento da secagem tem por desígnio a redução/eliminação da atividade de água do alimento possibilitando uma maior estabilidade física, química e microbiológica.

Segundo Menezes et al. (2013), por meio da secagem é plausível analisar o comportamento do material sólido através de curvas que relacionam a razão de umidade versus o tempo e a taxa de secagem. Estas curvas possuem informações essenciais para o desenvolvimento do processo e para um melhor dimensionamento dos equipamentos. Por intermédio delas, pode-se avaliar o tempo necessário de secagem de determinada quantidade de produtos (VILELA; ARTUR, 2008).

A temperatura, o tempo de secagem e a dimensão do alimento são considerados parâmetros de controle que variam de processo para processo. Os mesmos apresentam fortes influências em qualquer processo de secagem, já que, exercem efeitos sobre a taxa de secagem, teor de umidade e encolhimento do produto final. São exatamente essas características que contribuem na preservação dos produtos alimentícios (KARATANOS, 1999).

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo Geral**

Este trabalho tem como objetivo avaliar a cinética de secagem da batata-doce por diferentes técnicas de secagem, bem como, analisar os modelos matemáticos que melhor descrevem o comportamento difusional, a cinética de secagem e o encolhimento.

### **2.2. Objetivos Específicos**

- I. Obter as curvas de secagem em função do tempo para as secagens em estufa de convecção, estufa de circulação, refractance window, micro-ondas e termogravimetria (TG).
- II. Acompanhar a cinética de secagem da batata-doce, avaliando a influência da temperatura, o método de secagem e tempo total para atingir o equilíbrio.
- III. Aplicar os modelos matemáticos a fim de analisar a cinética de secagem para os modelos de Page e Thompson, assim como, os modelos de Lozano e Ratti para avaliar o encolhimento, ajustando os modelos matemáticos aos dados experimentais
- IV. Determinar a difusividade efetiva com e sem encolhimento, a partir da lei de Fick.



### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1. Batata doce

##### 3.1.1. Histórico da batata doce

A origem da batata doce (*Ipomoea batatas* L.) se deu na faixa compreendida entre a América Central e do Sul, conforme evidências arqueológicas, linguísticas e históricas. A extensa variedade de condições climáticas e a fácil adaptabilidade permitiram o seu desenvolvimento em regiões tropicais e de temperaturas moderadas, a exemplo da África, Ásia e América. Woolfe (1992), reporta estudos em que a batata-doce foi introduzida há mais de cinco mil anos e se estendeu através dos continentes durante os séculos XVII e XVIII, devido a seu caráter robusto, ampla adaptabilidade e a rápida capacidade de multiplicação.

A batata-doce pertence à família botânica Convolvulaceae, cuja espécie é dicotiledônea. Segundo a Embrapa (2008), a raiz abrange aproximadamente cinquenta gêneros e mais de mil espécies, todavia, apenas esta raiz tuberosa tem cultivo expressivo economicamente. Pode-se dividir a batata doce em dois tipos de raízes: as de reservas ou tuberosas, constituindo a parte de maior interesse comercial, e as de raízes absorventes, responsáveis pela absorção de água e nutrientes do solo. No desenvolvimento inicial a partir do crescimento das ramas, são formadas raízes tuberosas, cuja identificação se dá pela maior espessura, pela pouca presença de raízes e por se desenvolverem a partir dos nós. A partir do meristema cambial, formam-se as raízes absorventes, tanto nos nós quanto nos entrenós, são abundantes e bastante ramificadas, favorecendo a absorção de nutrientes (SILVA; LOPES; MAGALHÃES, 2002).

A produção de cultivares de batata doce no Brasil, tem um número elevado, apresentando ampla diversidade genérica em meio a elas, conforme aborda Miranda et al., (1995). Pesquisas realizadas pela Embrapa (2008), relatam que os diversos tipos de cultivares existentes se diferenciam sobretudo, pela coloração da casca, formato e cor da polpa. No Brasil, as cultivares: Brazlândia Branca, Brazlândia Roxa, Brazlândia Rosada, Princesa e Coquinho, são as mais difundidas.

### 3.1.2. Importância socioeconômica

Atualmente a *Ipomoea batatas*, é considerada a oitava cultura de maior produção mundial, segundo o CIP (2018). É uma planta de extrema importância socioeconômica, pois pode ser cultivada em quase todos os países, uma vez que fornece uma série de nutrientes alimentares. Trata-se de um alimento altamente energético, com alta capacidade de produzir energia por unidade de área e tempo (Kcal/ha/dia). Devido a este fato, as raízes tuberosas são largamente utilizadas na alimentação humana e animal, além de servir como matéria prima para a indústria de alimentos (MIRANDA et al., 1987; OLIVEIRA et al., 2006).

Pesquisas realizadas pelo IBGE (2005), relatam que a produção da batata doce vem crescendo demasiadamente, devido ao consumo excessivo de batata *in natura* e processada. No Brasil, o tubérculo é cultivado em todas as regiões, pois apresenta uma grande área territorial, além de uma gama diversidade de climas e diferentes tipos de solo, de modo, a obter uma imensa diversidade e ampla quantidade. A região Sul tem a maior produção de batata doce, tendo uma produção anual de 249.154 toneladas, correspondendo a 37 % da produção nacional (IBGE, 2016).

A produção por área e a produtividade da batata doce nas regiões brasileiras, podem ser vistas em números a título de conhecimento a partir da Tabela 1.

Tabela 1 - Área, produção e produtividade da batata doce nas regiões brasileiras

<b>Regiões</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>Produção (t)</b>	<b>Produtividade (t/ha)</b>
<b>Sul</b>	16.652	249.154	15
<b>Sudeste</b>	12.384	222.180	17,9
<b>Centro-Oeste</b>	684	199.960	25
<b>Nordeste</b>	19.194	170.601	9,8
<b>Norte</b>	640	7559	11,9

Fonte: IBGE, 2016.

De acordo com Souza et al., (2005), quando bem dirigido os plantios, torna-se plausível aumentar o rendimento da cultura, pois estas raízes podem ser colhidas a cada 4 a 5 meses, consentindo aos produtores rurais um melhor aproveitamento das oportunidades do mercado em decorrência da demanda.

### 3.1.3. Importância nutricional

As raízes tuberosas de batata doce são, fontes de vitaminas, energia e minerais. A composição química varia de acordo com a cultivar, as condições climáticas, a época da colheita, o manejo e o tempo de armazenamento. Visando uma excelente adequação nutricional, o conhecimento destas propriedades é de fundamental importância para a qualidade do produto e para um melhor processamento (MIRANDA, 1995).

Segundo Guedes (2004), com a imensa diversidade de nutrientes, a batata doce é considerada como sendo um potencial terapêutico. Os tubérculos de cor roxa possuem consideráveis teores de betacaroteno, sendo convertido pelo organismo em vitamina A, trata-se de um excelente antioxidante ajudando a prevenir o risco do câncer. Além disso, a batata propicia uma excelente saúde para pele, pois é rica em vitamina E. Possuem fibras que auxiliam na redução do colesterol, além de melhor no processo digestivo. A composição físico-química e nutricional da batata *in natura* pode ser observada pela Tabela 2.

Tabela 2- Composição físico-química e nutricional da *Ipomoea batatas*.

<b>Componentes</b>	<b>Composição da batata-doce por 100g de parte comestível (crua)</b>	<b>Composição da batata-doce por 100g de parte comestível (cozida)</b>
Umidade (%)	69,5	80,4
Energia (Kcal)	118	77
Proteína (g)	1,3	0,6
Carboidrato (g)	28,2	18,4
Fibra Alimentar (g)	2,6	2,2
Cinzas (mg)	0,9	0,4
Cálcio (mg)	21	17
Magnésio (mg)	17	11
Fósforo (mg)	36	15
Vitamina A (mg)	252	300
Vitamina C (mg)	16,5	23,8
Vitamina B5 (mg)	Traços	2,57

Fonte: TACO, 2011.

Como listado na tabela acima, as raízes apresentam em média 70% de umidade, 26% de carboidratos, 1,05% de cinzas e 0,61% de fibras, conforme reporta Cereda (1985).

Norda (1992), relata a importâncias dos carboidratos, dentre eles, enfatiza-se o amido, pois possui em média um teor equivalente a 30 %. A composição química deste carboidrato propicia ao organismo excelentes propriedades funcionais. O uso do amido presente na batata doce é de amplo interesse ao setor industrial, pois revela propriedades adesivas que viabilizam o seu uso nas mais diversas finalidades, dentre elas, as indústrias alimentícias, de papel, têxteis, além da produção de etanol (GONÇALVES NETO et al., 2012).

#### **3.1.4. Teor de água**

O teor de água contida nos alimentos, pode ser encontrada em duas formas: seja no conteúdo de umidade ou na atividade de água. Park e Antônio (2006), realizaram estudos sobre a quantidade de água presente nos alimentos, abordando a execução do teor de umidade em função dos processos microbiológicos, e também nos surgimentos de bactérias, fungos e leveduras.

A água presente nos alimentos se apresenta em duas formas diferentes: água ligada e água livre. Quando somadas, constituem-se o teor total de umidade presente nos produtos alimentícios. As duas formas de água podem ser classificadas, como:

- Água livre – é similar a água pura, uma vez que, apresenta propriedades iguais. Por este motivo, há uma maior facilidade para promover o crescimento de microrganismos para reações enzimáticas e físicas, afetando diretamente a qualidade do produto.

A remoção da água livre dos alimentos é bastante fácil, pois as moléculas de água presentes nos alimentos estão fracamente ligadas ao soluto (MARCINKOWSKI, 2006).

Kotovicz (2011), relata que o processo de secagem facilita a eliminação da água livre dos alimentos. Desse modo, o produto está susceptível a alterações, como as ocorridas na desidratação osmótica (exceto incorporações de sólidos), isso se deve ao fato da eliminação da água presente nos materiais, ser provocada pela evaporação da mesma.

- Água ligada – devido ao contato de solutos e alguns constituintes do tipo, não aquosos, apresenta uma menor mobilidade, ou seja, a sua eliminação torna-se mais difícil.

De acordo com Ribeiro e Seravalli (2004), a ligação de água é representada por vários graus, permitindo tal subdivisão:

- Água constitucional – constituem-se de ligações iônicas, e por isso, apresentam uma forte ligação entre a água ligada e os constituintes não aquosos;
- Água vicinal – é predominantemente representada por águas que ocupam os sítios mais chegados aos grupos hidrofílicos presentes nos constituintes não aquosos;
- Água de multicamadas – apesar de ainda possuir uma forte interação com os solutos, a água ligada está fracamente unida aos constituintes não aquosos do alimento.

Os solutos são normalmente predominados como sendo, água ligada, presentes ao redor de compostos não aquosos, ou seja, apresenta diferentes propriedades significativas da água em maior quantidade no mesmo sistema. Apresentam propriedades como: elevada energia de ligação e baixa pressão de vapor. Quando indisponível como solventes, proporciona baixa mobilidade molecular (FENNEMA, 1985).

A qualidade do alimento pode ser diretamente interferida quando se altera a quantidade de água ligada ou até mesmo a forma de ligação que a mesma possui com os sólidos, pois a água ligada se apresenta em maior predominância nos alimentos.

Evidenciando a qualidade do produto, é de fundamental importância a utilização de alguns métodos para determinação e remoção do teor de umidade contida nos alimentos. Existe um teor de umidade considerado seguro no ramo alimentício, eles por sua vez, devem ser conhecidos e respeitados para garantir a qualidade do produto.

O conteúdo de umidade presente nos alimentos pode ser evidenciado por valores obtidos experimentalmente, tendo em vista que, o teor de umidade de determinado produto estabelece uma relação direta entre a massa de água presente no material e a massa de matéria seca (BROD, 2003).

Contudo, o processo de secagem tem por objetivo diminuir o teor de água livre, assegurando uma maior conservação do alimento em função da redução do crescimento microbiano e das reações químicas e enzimáticas, além disso, esse processo implica numa considerável redução de volume do produto, proporcionando uma redução na quantidade de embalagem por unidade de alimento em relação ao produto *in natura*, reduzindo assim, os

custos com manipulação, transporte e armazenamento (AGUIRRE, 2002; GOUVEIA et al, 2002; ROMERO-PEÑA & KIECKBUSCH, 2003; MARTINAZZO et al., 2007).

## **3.2. Secagem**

### **3.2.1. Processo de secagem**

Durante o armazenamento dos legumes, especificamente, as batatas doces, estão sujeitas a perdas significativas. Embora seja possível estocar os grãos sem controle atmosférico, o mesmo não ocorre com as batatas, exigindo assim, um armazenamento em baixas temperaturas com a finalidade de controlar o fluxo de mercado e aumentar o período de conservação (PARKIN & SCHWOBE, 1990).

Keey (1972), define a secagem como sendo, a remoção de uma substância volátil (comumente, mas não exclusivamente, água) de um produto sólido, isto é, a operação na qual a atividade de água de um alimento é diminuída pela remoção de água, através de sua vaporização. Todavia, sabe-se que a estabilidade de armazenamento de produtos alimentícios é garantida quando a atividade de água ( $a_w$ ) for inferior a 0,6 (WRAY et al., 2015).

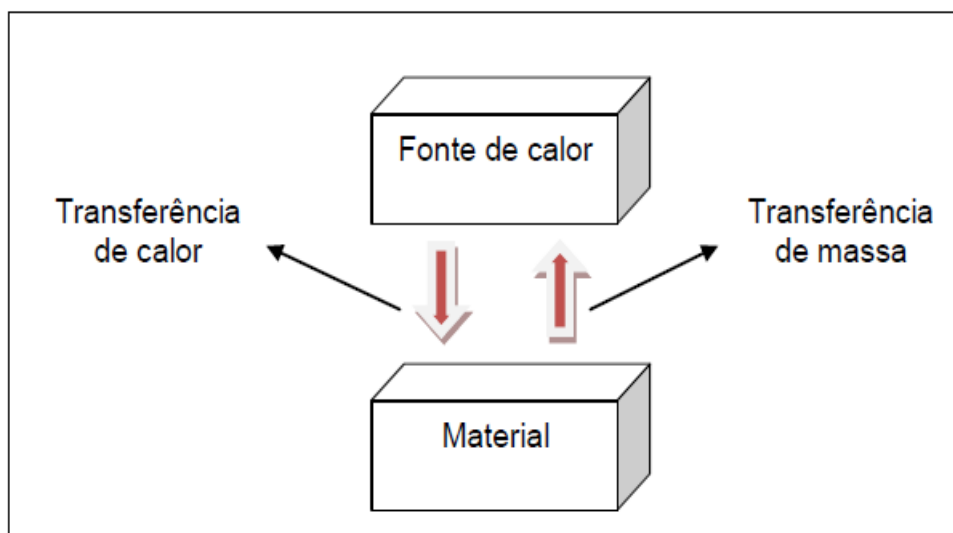
A secagem é o processo comercial mais utilizado para preservar a qualidade de produtos agrícolas. É uma prática antiga, que iniciou com a secagem ao sol, com a finalidade de preservar os excedentes das colheitas para serem consumidas nos períodos de escassez (AGUIRRE, 2002; PALACIN *et al.*, 2005). Durante o processo de desidratação, as substâncias químicas, físicas e nutricionais sofrem alterações nas propriedades, pois os produtos alimentares são sensíveis ao calor tornando-os mais complexos. Os principais fatores que corroboram para isto, é a temperatura, o tempo e o conteúdo do produto ( MANONMANI et al., 2016).

Durante o processo de secagem, a transferência de calor possui três mecanismos distintos: convecção, condução e radiação. Na secagem comercial, utiliza-se o mecanismo de transferência por convecção, que consiste num fluxo de ar aquecido penetrando na amostra. Meloni (2009), reporta que o ar possui funcionalidade dupla, pois, leva calor ao

alimento permitindo a evaporação do teor de umidade, além de ser o veículo de transporte do vapor úmido liberado pelo alimento.

Diante de uma fonte de calor, o sólido está sujeito a transferências de calor e massa, conforme mostra o esquema abaixo.

Figura 1 - Esquemática da transferência de calor e massa.



Fonte: ALVES, 2010.

Estudos realizados por Park et al., (2007), quando um sólido está exposto a qualquer tipo de secagem, existe uma ocorrência simultânea de dois processos, tais como:

- Transferência de energia – essa transferência ocorre do ambiente, provocando a evaporação de umidade superficial do produto. Fatores como, condições externas de temperaturas, umidade do ar, fluxo e direção do ar, forma física e pressão, são elementos pelos quais esta transferência é dependente.
- Transferência de massa – advém do interior do produto para a superfície, sendo esta acompanhada pela evaporação como consequência do primeiro processo de secagem. O fluxo interno de umidade se dá em função da natureza física do produto, da temperatura e quantidade de umidade presente.

### 3.2.2. Técnicas de secagem

Existem diversos métodos de secagem e sua classificação se dá de acordo com a forma com que o calor é fornecido, o modo de operação, a temperatura e pressão de operação. Tais métodos podem ser classificados em: secagem em bandeja, leito fluidizado, cabine, túnel, atomizador (spray-dryer), liofilização, entre outros. Nessa pesquisa, os secadores utilizados foram: estufa de convecção, estufa de circulação, *refractance window*, micro-ondas e temogravimetria (TG).

- Secagem em estufa de convecção

Convecção natural é um mecanismo, ou tipo de transporte de calor, no qual o movimento do fluido não é gerado por qualquer fonte externa (tal como uma bomba, ventilador, dispositivo de sucção, etc.) mas somente por diferenças de densidade no fluido ocorrendo devido a gradientes de temperatura. Em convecção natural, fluido circundante uma fonte de calor recebe calor, tornando-se menos densa e subindo. O fluido resfriante e circundante então move-se e o substitui. O fluido resfriante é então aquecido e o processo continua, formando uma corrente de convecção; este processo transfere energia térmica do fundo para o topo da célula de convecção. A força condutora para a convecção natural é a flutuabilidade (relacionada ao empuxo), um resultado de diferenças nas densidades de fluidos.

Além da importância técnico-científica, os secadores convectivos, são, ainda hoje, largamente empregados devido aos baixos custos de implantação e manutenção, à facilidade de operação e a sua grande versatilidade, que lhes permitem ser utilizados para diferentes tipos de sementes. (PRADO, 1999; FERREIRA, 2003).

- Secagem em estufa de circulação

A secagem por ar quente, em particular, é um antigo processo usado para preservar alimentos em que o sólido a ser desidratado é exposto continuamente a uma corrente de ar aquecido onde a umidade evapora (RATTI, 2001).

No processo de secagem por fluxo de ar aquecido, o sistema é fechado e a ventilação forçada suga o ar através de um purificador de ar, que consiste num sistema de filtro e fica



acoplado no item de ventilação. O ar passa por uma tubulação de conexão, através da ventilação de ar forçado, até uma câmara de aquecimento (TEBCHERANI et al., 2010).

Tebcherani et al., (2010), relatam que a câmara é capaz de aquecer o ar até a temperatura desejada e pode ser controlada por um sistema de termopar inserido dentro da câmara. A melhor operação unitária para desidratação consiste em realizar a secagem utilizando ar quente. O tempo de secagem varia conforme a quantidade de vapor de água presente no ar, a temperatura do ar, a quantidade de água no alimento, a composição, o tamanho dos cortes e a quantidade de alimento colocada no secador.

A circulação forçada de ar aquecido através do produto promove o arraste da umidade presente no produto de maneira mais rápida e eficiente, resultando em redução do tempo nos processos de secagem de frutas e hortaliças. Esse sistema é hermeticamente fechado, e o ar aquecido é distribuído através da peneira, atravessando o produto a ser desidratado, de maneira homogênea (TEBCHERANI et al., 2010).

- Secagem em refractance window

A secagem por *refractance window* utiliza energia térmica a partir de água quente, em temperaturas muito próximas a da ebulição para secar uma fina camada de material através da condução, convecção e radiação (NINDO et al., 2004).

O *refractance window* (RW) é um secador contínuo, onde o produto a ser desidratado é espalhado sobre uma esteira plástica que flutua na superfície da água quente circulante, em canaletas. Devido a sua diversificada capacidade de lidar com uma gama de produtos líquidos, a sua finalidade é transformar frutas, legumes ervas e outros produtos do tipo, em pó e concentrados com alto valor agregado (NINDO; TANG, 2007).

Por Nindo (2008), o calor latente de condensação do vapor de água é transferido por convecção para a superfície inferior do filme de plástico, e por ser muito fino, quase que imediatamente atinge a temperatura de circulação de água quente. A água é continuamente reaquecida, melhorando desse modo a eficiência térmica do sistema. O uso de água quente como meio de transferência de calor e com temperaturas pouco abaixo da ebulição é exclusivo para sistema de secagem RW.

- Secagem em micro-ondas

Segundo Monzó- Cabrera et al., (2000), a secagem em micro-ondas é uma alternativa eficiente em relação aos processos convencionais, pois a geração de calor não depende da condutividade térmica do material a ser seco.

As micro-ondas são radiações eletromagnéticas caracterizadas por comprimentos de onda entre 1 mm e 1 m, sendo poucos comprimentos de onda utilizados industrialmente, e por suas frequências, sendo a única irrestritamente autorizada em todo o mundo a de 245 Hz.

As ondas interagem com o material gerando calor em seu interior, para os alimentos essa interação é expressa pela remoção de calor. Nesses materiais, dois meios são distinguidos: o meio com perda por condução, que contém cargas livres (metal) ou íons (soluções com sal), que por oscilação sofrem aquecimento e os meios complexos, como os produtos biológicos, nos quais a remoção de calor é devida principalmente a perdas dielétricas nas moléculas polares, onde uma pequena parcela do calor gerado é por oscilação (LAGUERRE et al., 1998).

O aquecimento é um importante característica da secagem não uniforme de umidade, isto é, as partes que contém maior umidade irão produzir mais calor. E com isso, umidades iniciais diferentes levarão a taxas de secagem diferentes. Assim, quanto mais alta a umidade inicial do produto, mais rápido será sua secagem, já que será produzido mais calor. Ao final da secagem, quantidades de umidade muito próximas são encontradas para as amostras com diferentes umidades iniciais, de onde se pode dizer que a secagem por micro-ondas pode ser usada eficientemente para produzir uma distribuição de umidades constante ao longo do produto MONZÓ- CABRERA et al., (2000).

- Análise termogravimétrica (TG)

Trata-se de um sistema capaz de medir continuamente a massa de um material enquanto este é submetido a uma programação controlada de temperatura. A termogravimetria é um método termoanalítico empregado para avaliar mudanças de massa permitindo determinações específicas, bem como analisar a decomposição térmica das amostras (GIRON, 2002). Segundo Ionashiro (2005) as curvas TG permitem obter conclusões

sobre a estabilidade térmica da amostra, sendo, entre as técnicas termoanalíticas, a mais utilizada.

A análise termogravimétrica permite conhecer detalhadamente as alterações que o aquecimento pode causar na massa das substâncias, como modificações da estrutura molecular e ainda estabelecer a faixa de temperatura em que as mesmas sofrem processos de decomposição, como por exemplo o amido que sofre degradação na faixa de temperatura entre 30 °C a 300°C (CARVALHO FILHO, 2000; CEREDA; VILPOUX, 2003).

A termogravimetria é um método basicamente quantitativo, uma vez que a variação de massa pode ser exatamente determinada. Entretanto, o intervalo de temperatura onde essa variação de massa ocorre, é qualitativo, tendo em vista que esse parâmetro depende de fatores instrumentais e características da amostra (IONASHIRO, 2005).

### **3.2.3. Cinética de secagem**

A cinética de secagem tem por finalidade promover o estudo do comportamento do material analisado ao longo do processo, e ainda, estima-se o tempo necessário de secagem (CARVALHO, 2014). Os dados experimentais extraídos no processo de secagem, são representados através de curvas, de maneira, a relacionar o teor de umidade com o tempo (GURGEL, 2014).

As condições de secagem podem ser determinadas através de características específicas de cada produto, associadas tanto às propriedades que o ar oferece a cada secagem, quanto ao meio de transferência de calor adotado. Portanto, a fundamentação na transferência de calor e de massa em relação ao processo de secagem, pode ser apresentada em três períodos ao longo do tempo, conforme mostra a Figura 2 (PARCK, 2001).

Figura 2 - Curvas típicas do processo de secagem

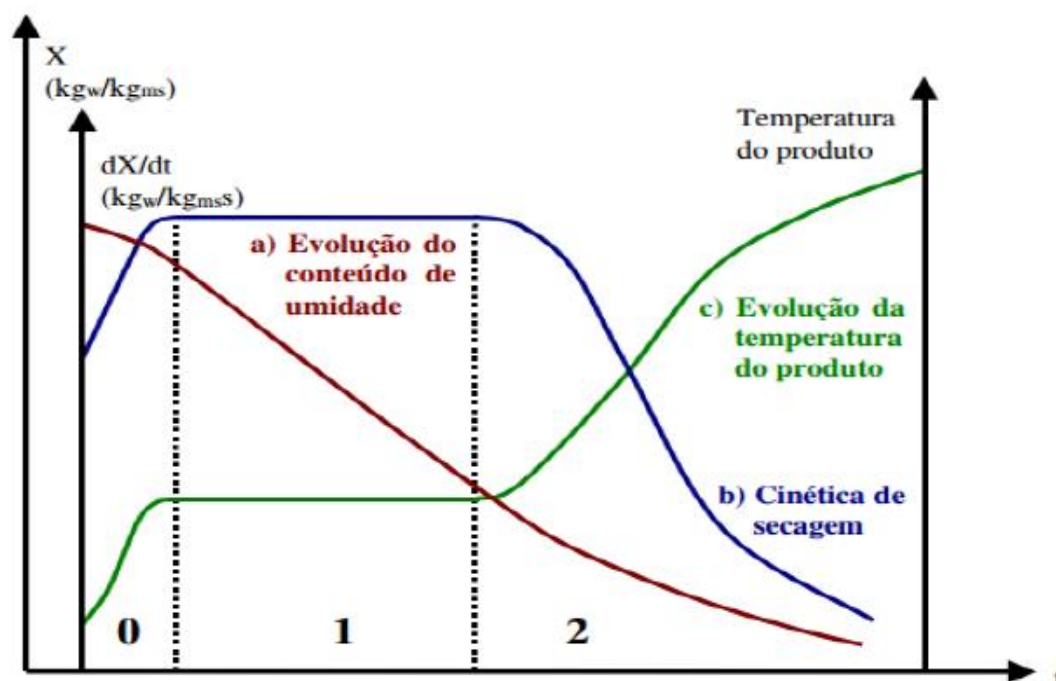
Fonte: PARK, 2001.

A curva (a) representa a diminuição do teor de água do produto durante a secagem, conteúdo de umidade do produto em base seca ( $X_{bs}$ ), em relação à evolução do tempo de secagem ( $t$ ). Com isso, a curva é obtida pesando o produto durante a secagem numa determinada condição de secagem (BROD, 1999).

A curva (b) caracteriza a velocidade (taxa) de secagem do produto, variação do conteúdo de umidade do produto por tempo ( $dX/dt$ ), em relação à evolução do tempo ( $t$ ), ou seja, é a curva obtida diferenciando a curva (a). De modo que, as variáveis tempo de processo e perda de umidade são inversamente proporcionais, uma vez que, quanto maior o tempo, mais lento será a perda de umidade de um determinado produto (BROD, 1999).

A curva (c) ressalta a variação da temperatura do produto durante a secagem, ou seja, variação da temperatura do produto ( $T$ ) em relação à evolução do tempo ( $t$ ). Logo, a curva é obtida medindo a temperatura do produto durante a secagem (BROD, 1999).

Segundo Brod (1999), podemos avaliar os períodos da seguinte forma:



O primeiro período caracteriza o início da secagem. Nesse período tem-se uma elevação gradual da temperatura do produto e da pressão de vapor de água. Essas elevações têm prosseguimento até o ponto em que a transferência de calor seja equivalente à transferência de massa (água).

O segundo período é caracterizado pela taxa constante de secagem, onde a velocidade do processo é constante. A água sobre a superfície do alimento é a água evaporada, tipicamente chamada de água livre (água de fácil remoção). A transferência de massa e de calor é equivalente e, portanto, enquanto houver umidade na superfície do produto para ocorrer a evaporação, a velocidade de secagem é constante.

No terceiro período, como visto explicitamente, a taxa de secagem é decrescente. O teor de umidade presente na superfície do produto é menor, reduzindo assim, a transferência de massa. Em relação ao fluxo de calor, observa-se que o mesmo não é compensado pela transferência de massa; o fator limitante nessa fase é a redução da migração de umidade do interior para a superfície do produto. A temperatura do produto aumenta ao longo do processo de secagem, atingindo a temperatura do ar de secagem. Quando o produto atinge o ponto de umidade de equilíbrio em relação ao ar de secagem, o processo é encerrado.

Fazendo relação aos períodos de secagem com as curvas, é evidente que durante o período (1) com velocidade constante, o ar recupera, sob a forma de vapor, toda a perda sob forma de calor, isto é, a temperatura do produto se assemelha com a temperatura do ar de secagem, e por isso, os fluxos de calor e massa são compensados. Já em relação ao período (2), que por sua vez, apresenta velocidade decrescente de secagem, a transferência de calor do ar para com o produto não é compensada pela transferência do vapor de água, e evidentemente, haverá um aumento na temperatura do produto, de modo a atingir a temperatura do ar de secagem. Todavia, a taxa de transporte interno de água é menor quando comparado com a taxa de evaporação (BROOKER et al., 1992).

A complexidade dos fenômenos de secagem conduz os pesquisadores a proporem numerosas teorias e múltiplas fórmulas empíricas para predizerem a taxa de secagem. Os métodos de cálculo da taxa de secagem diferem de acordo com o período verificado no processo: taxa constante e/ou taxa decrescente, pois no primeiro período, as transferências de calor e massa, são analisadas na superfície do material e ar de secagem, enquanto que no segundo período a análise baseia-se nas transferências internas que conduzem a secagem. Para produtos agrícolas e alimentícios, o período de taxa decrescente é quase sempre o único observado e, neste caso, a transferência interna de água é que governa e determina a taxa de secagem (DAUDIN, 1983).

### **3.3. Modelos matemáticos**

### 3.3.1. Modelos teóricos

O perfil de distribuição de água no interior do produto pode ser descrito por modelos teóricos, além de empregarem fundamentos na transferência de calor e massa. Faz-se necessário que haja uma relação funcional entre o teor de umidade, temperatura e coeficiente de difusão.

Muito embora exista hipóteses a serem consideradas, como: inexistência do efeito de capilaridade, encolhimento desprezado, equilíbrio térmico instantâneo com o ar, além dos efeitos da transferência de energia e massa e de um corpo para o outro, a teoria da difusão líquida vem sendo extremamente utilizada na área de secagem.

A difusão baseada na segunda Lei de Fick é considerada o mecanismo principal por alguns modelos teóricos que descrevem a taxa decrescente de secagem de um determinado produto, pois estabelece o fluxo de massa por unidade de área proporcional ao gradiente de concentração de água (PARK et al., 2001).

As curvas de secagem fornecem dados suficientes para analisar o processo de secagem dos alimentos, e podem ser apresentadas na forma de teor de água normalizada  $\left(\frac{X}{X_o}\right)$  em função do tempo (t), da taxa de secagem (N) em função do teor de água absoluto (X) e da relação água livre,  $RU = \left(\frac{X-X_e}{X_o-X_e}\right)$  em função do tempo (SOUSA, 1999).

Crank (1975), aborda que a teoria da difusão de umidade (como líquido ou vapor) é de grande importância, pois é considerada a principal teoria capaz de interpretar a cinética de secagem de alimentos e produtos agrícolas em geral. Tal teoria, é representada com base na segunda Lei de Fick, conforme mostra a Equação 1.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{ef} \nabla U) \quad (\text{Eq. 1})$$

Em que:

X: Teor de água do produto, decimal, base seca;

t: Tempo de secagem, (s);

$D_{ef}$ : Coeficiente de difusão, ( $m^2/s$ );

$\nabla$ : Operador diferencial (gradiente);

U: Concentração de água.

Muitas soluções analíticas foram desenvolvidas por Crank (1975), na forma de séries para a equação de difusão, levando em consideração distintas condições iniciais e de contorno, além de casos em que a difusividade pode variar de forma linear ou até mesmo, na forma exponencial com a concentração de umidade, evidenciando um fenômeno de migração complexo. Têm-se em conjunto a difusividade aparente, que por sua vez, envolve todos os efeitos que podem afetar neste fenômeno, entretanto essas soluções se aplicam desde sólidos com formas geométricas simples a complexas.

Segundo a teoria de difusão de líquido, a secagem de materiais homogêneos pode ser esclarecida pela Equação 2:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D \cdot \left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{c}{r} \cdot \frac{\partial X}{\partial r} \right) \quad (\text{Eq. 2})$$

Sendo:

X: teor de água do produto, decimal, base seca;

C: Fator de forma. 0, para corpos planos, 1 para corpos cilíndricos e 2 para corpos esféricos;

r: distância radial ou espessura, (m);

t: tempo, (s);

D: coeficiente de difusão, (m<sup>2</sup>/s).

A Equação 2, permite a obtenção de diversas soluções analíticas aplicadas aos sólidos de formas geométricas simples, tais como: placas, esferas e cilindros.

Uma solução analítica para a Lei de Fick foi proposta por Crank (1975), levando em consideração apenas a distribuição de umidade inicial uniforme e ausência de qualquer resistência térmica para uma placa plana infinita, conforme mostra a Equação 3:

$$RU = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[ \frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D_{ef} t}{4 L^2} \right] \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde:

RU: razão do teor de umidade;

$X_t$ : teor de água médio no tempo ( $t$ );

$X_e$ : teor de água de equilíbrio;

$X_0$ : teor de água inicial;

$D_{ef}$ : difusividade efetiva;

$t$ : tempo;

$L$ : dimensão característica (meia espessura da placa).

De acordo com Singh et al., (1978, APUD MARQUES, 2005), muitos pesquisadores afirmam que o coeficiente de difusão não é uma constante, mas sim, uma função do teor de água.

Por intermédio da Equação 3, torna-se plausível dizer, que a migração de água em sólidos pode ser caracterizada pela Segunda Lei de Fick. Como esta equação não leva em consideração o encolhimento, não podem ser aplicadas para alimentos que apresentem alto teor de água, tais como: uva, caqui, ameixa e caju, tendo em vista que a variação do volume é grande, Gabas (1998, APUD MARQUES, 2005).

Com o intuito de se encontrar valores de difusividade efetiva, considerando o encolhimento do material, aplica-se o método de regressão linear, usando a média aritmética entre a espessura média no início e no final da secagem com base em estudos realizado por Mazza e Le Mauger (1978) para a secagem de fatias de cebolas e Murr (1992) para as de batatas.

A difusividade efetiva, considerando-se o encolhimento, é determinada substituindo-se a razão de umidade do produto pela concentração de umidade, conforme Equação 4, (PARCK, 1987).

$$\frac{C-C_e}{C_0-C_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[ \frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D_{ef} t}{4 L^2} \right] \quad (\text{Eq. 4})$$

Sendo:

$C$  = concentração de umidade,  $X/V$  ( $\text{g H}_2\text{O g}^{-1} \text{ ms}^{-1} \text{ m}^{-3}$ );

$C_e$  = concentração de umidade de equilíbrio,  $X_e/V_e$  ( $\text{g H}_2\text{O g}^{-1} \text{ ms}^{-1} \text{ m}^{-3}$ );

$C_0$  = concentração de umidade inicial,  $X_0/V_0$  ( $\text{g H}_2\text{O g}^{-1} \text{ ms}^{-1} \text{ m}^{-3}$ );

$n$  = número de termos.



A segunda Lei de Fick ou teoria da difusão líquida tem sido adotada para o estudo de secagem por muitos pesquisadores de produtos agrícolas, pois estabelece a difusão de água em termos do gradiente de concentração (CAVALCANTI MATA, 1997; GOUVEIA, 1999).

No estudo da cinética de secagem de polpa de carambola Silva et al., (2016), encontram coeficientes de determinação ( $R^2$ ) equivalentes a 99 % para as temperaturas de 40, 50 e 60 °C para o modelo de Fick, conduzindo assim, um bom ajuste.

Sousa et al., (2014), também encontraram o modelo de Fick como o melhor ajuste no estudo da cinética de secagem do morango, cujos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) foram superiores a 99 %.

Martinazzo et al., (2007), obtiveram coeficientes nos valores de 99,92, 99,47, 99,17 e 99,15 % para as temperaturas de 30, 40, 50 e 60 °C na análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão.

## **Modelos Empíricos**

A utilização de modelos empíricos, torna-se necessária, pois em determinadas situações, os modelos teóricos e semi-teóricos não são apropriados para ajustar o comportamento da taxa de secagem, oriundo das intervenções no efeito das resistências externas e internas do produto.

Segundo Keey (1972), os modelos empíricos baseiam-se em dados experimentais e análises adimensionais. Derivam uma relação direta entre o conteúdo médio de água e o tempo de secagem. Eles negligenciam os princípios do processo de secagem e seus parâmetros não apresentam significado físico. Entretanto, eles são capazes de descrever a curva de secagem, para as condições em que o estudo foi desenvolvido.

Karim e Hawlader (2005), ao fazerem pesquisas na área de modelagem matemática para experimentos de secagem de frutas tropicais, demonstraram o processo de secagem decrescente, isto é, interno ao alimento, desenvolvendo modelos empíricos. Para tal desenvolvimento, foram realizados alguns experimentos laboratoriais utilizando amostras de bananas. Estes modelos foram de grande valia para o estudo da taxa de secagem decrescente independente da condição de umidade que o material apresente, e também o tempo desse processo.

De acordo com Ceylan et. al., (2007), utilizaram alguns modelos matemáticos do tipo empírico, com finalidade de determinar a perda de umidade do abacate, uma vez que, o modelo se aplicou perfeitamente, delineando positivamente sua perda de umidade.

Corrêa et al. (2007), Hacıhafizoglu et al. (2008) e Costa et al. (2011) também verificaram coeficientes de determinação ( $R^2$ ) superiores a 0,99 ao estudarem a cinética de secagem de grãos de feijão, grãos de arroz e sementes de crumbe, respectivamente.

Sabe-se que o modelo de Fick é perfeitamente enquadrado para longos tempos de secagem, adotando-se, somente, os primeiros termos da série, o mesmo se ajusta similarmente a solução dos modelos empíricos, onde considera a taxa de secagem decrescente. Após adotados os primeiros termos da série, é feita a linearização da reta, posteriormente, os gráficos são plotados de  $\ln(X)$  em função do tempo (t). Com isso, será obtida a inclinação da reta, concebida pela constante de secagem (K) (MENEZES et al., 2013).

Simplificando a Equação de Fick, torna-se possível determinar as constantes (K) aplicadas em sólidos geométricos simples, tais como: placa plana, cilindro e esfera. Tais constantes referem-se aos modelos matemáticos empíricos, como mostra as Equações 5, 6 e 7.

$$\text{Placa Plana: } k = \left[ \frac{-\pi^2 D_{ef}}{4L^2} \right] \quad (\text{Eq. 5})$$

$$\text{Cilindro: } k = [D_{ef}] \quad (\text{Eq. 6})$$

$$\text{Esfera: } k = \left[ \frac{-\pi^2 D_{ef}}{r^2} \right] \quad (\text{Eq. 7})$$

Onde:

$D_{ef}$ : coeficiente de difusão efetiva;

L: espessura da amostra;

r: raio da amostra.

Evidentemente, estas equações começaram a ser utilizadas comumente pelos pesquisadores com a finalidade de descrever o processo de secagem de alimentos, de modo a delinear a transferência de massa interna do produto.

Nesta pesquisa, utilizou-se a Equação 14, indicada para placa plana, sendo K, uma constante de secagem. Henderson & Pabis (1961, APUD GUEDES E FARIA, 2000), descrevem esta constante (K) como uma equação do tipo Arrhenius em função da temperatura do ar de secagem.

A descrição de cada modelo e abordagem de suas principais características, torna-se fundamental ao longo dessa pesquisa, de forma a facilitar a análise individual para o produto.

### 3.3.1.1. Modelo de Page

Em 1949 foi desenvolvido o modelo de Page, cuja principal finalidade consiste na verificação da taxa de secagem ao longo do processo de secagem nos alimentos, por intermédio da constante (K). O modelo de Page tem sido bastante empregado por diversos autores em pesquisas utilizando frutas e legumes (DOYMAZ, 2007).

Page expressa seu modelo de acordo com a Equação 8:

$$RU = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \exp(-kt^n) \quad (\text{Eq. 8})$$

Onde:

RU: expressa a razão do teor de umidade;

X: o teor de umidade em base seca (g água/ g matéria seca);

X<sub>0</sub>: caracteriza o teor de umidade inicial em base seca (g água/ g matéria seca);

X<sub>eq</sub>: expressa o teor de umidade em equilíbrio em base seca (g água/ g matéria seca);

K: representa a constante de secagem do modelo [s<sup>-1</sup>];

t: tempo (s);

n: parâmetro de ajuste (adimensional).

A introdução do parâmetro n neste modelo, evita erros resultantes da resistência interna na transferência de umidade, de modo, a conferir uma satisfatória moderação do tempo (AZZOUZ et al., 1998).

No decorrer do processo de secagem de banana maçã realizada em secador de leito fixo, foi possível averiguar a cinética de secagem, e assim, apurar de forma concisa que, dentre os mais variados modelos existentes, o modelo de Page foi o mais adequado em virtude da cinética apresentada para esta fruta (SILVA et al., 2003). Diógenes et al. (2013), usaram este modelo para estimar qual seria o comportamento na secagem de grãos de abóbora. Também utilizado por Doymaz (2004) para aferir as curvas de secagem de cubos de cenouras em quatro temperaturas diferentes. Barbosa et al. (2007), reportaram este modelo como o mais adequado na avaliação da cinética de secagem da erva cidreira.

Azoubel et.al. (2008), levantaram estudos sobre a modelagem matemática da cinética de secagem para mangas, onde puderam constatar diante aos dados experimentais, o modelo de Page, como sendo o mais apropriado.

Ceylan et. al. (2007), relataram que ao realizar o processo de secagem de frutas, como: abacate, banana e kiwi empregando modelos empíricos, verificaram que o modelo de Page é o que melhor se ajusta durante o período de secagem, uma vez que, apresentou coeficientes de determinação ( $R^2$ ) superior a 99 %.

De acordo com Al-Aouar et. al. (2007), analisaram a secagem de frutas que apresentam teor de umidade inicial próximos, de forma a adquirir a taxa de secagem através do modelo de Page. Após estas análises, foi possível constatar que o modelo de Page, é o que melhor representa o fenômeno.

### **3.3.1.2. Modelo de Thompson**

O modelo de Thompson et al. (1968) aplicado no estudo da cinética de secagem, baseia-se em leis de transferência de calor e massa, e em equações empíricas. Segundo Borém et al., (2008), o modelo proposto por Thompson divide a massa em várias camadas, alterando as condições do ar e da massa, em função do incremento de tempo.

Para modelagem matemática de Thompson, utiliza-se a Equação 9 para predizer um ajuste aos dados obtidos experimentalmente.

$$RU = \exp \frac{-a-(a^2+4bt)^{0.5}}{2b} \quad (\text{Eq. 9})$$

Onde:

RU: expressa a razão do teor de umidade;

t: tempo (s);

a e b: parâmetros de ajuste (adimensional).

Com a passagem de ar durante um determinado intervalo de tempo por uma camada fina, evapora-se uma certa quantidade de água do produto, essa água evaporada passa para o ar, provocando uma diminuição na temperatura do ar em decorrência do aumento na transferência de água (SOUZA, 2002).

De acordo com Borém et al. (2008), o teor de água de equilíbrio depende da temperatura e da umidade relativa do ar, nas vizinhanças do grão. Segundo o autor, a entalpia de vaporização da água no produto depende da sua temperatura e do seu teor de água, e a entalpia específica do produto depende do teor de água deste.

Melo et al. (2016), ao estudar a secagem de grãos de feijão carioca, verificou que o modelo de Thompson apresentou o melhor ajuste em temperaturas de secagem de 55 e 65 °C.

Faria et al. (2012), avaliando a secagem de crambe em temperaturas de 30, 40, 50, 60 e 70 °C, reconheceram para o modelo de Thompson ajuste excelente, podendo ser usado na representação da cinética de secagem em camada fina das sementes de crambe.

Sousa et al. (2006) também recomendam o uso desse modelo para representação da cinética de secagem de produtos como o milho, farelo de mamona e milho doce.

### **3.3.1.3. Encolhimento**

Durante o período de secagem, o produto submetido no processo está suposto a ocorrência de alteração física, como por exemplo, o fenômeno do encolhimento. O encolhimento (S) é normalmente representado pela Equação 10:

$$S = \frac{V}{V_0} \quad (\text{Eq. 10})$$

Sendo:

$S$  = encolhimento (adimensional);

$V$  = volume da amostra em um determinado tempo ( $m^3$ );

$V_0$  = volume inicial da amostra ( $m^3$ ).

Tal equação relaciona o volume de uma amostra a um determinado tempo de secagem e o volume da amostra no tempo inicial, representando uma alteração dimensional do volume, área e espessura.

A medida que aumenta o teor de água removido, aumenta-se o encolhimento dos materiais biológicos, uma vez que, as tensões de contração originadas no interior das amostras aumentam com o aumento da quantidade de água extraída do material (MAYOR; SERENO, 2004).

Com a finalidade de predizer o fenômeno do encolhimento, faz-se o uso de equações segundo mostra o Quadro 1, tais equações relacionam o encolhimento ( $S$ ) em função da razão de umidade ( $RU$ ). Estas equações classificam-se em; empíricas lineares e não lineares, ajustadas aos dados experimentais por meio de regressões matemáticas.

Quadro 1 - Modelos matemáticos utilizados para estimar o encolhimento.

	Designação do modelo	Modelo	Referência
Linear	Lozano	$S = b1 \text{ RU}^* + b2$	Queiroz e Nebra (2001)
Não linear	Ratti	$S = b1 + b2 \text{ RU}^* + b3 (\text{RU}^*)^2 + b4(\text{RU}^*)^3$	Ratti (1994)

Fonte: Leite et al. (2015).

Kilpatrick et al., (1955) foi um dos primeiros a propor uma relação linear entre o encolhimento sofrido pelo material e a quantidade de água removida.

Leite et al. (2015), utilizaram estes modelos matemáticos de Lozano e Ratti para prever o fenômeno do encolhimento em estudo sobre a contração volumétrica e cinética de secagem de fatias de banana variedade da terra.

De modo geral, a batata doce apresenta um amplo desenvolvimento em regiões com climas frios e quentes. Atualmente, a sua produção está em larga escala, visto que a demanda por este tubérculo cresce cada vez mais. Estas raízes tuberosas apresentam diversos nutrientes alimentares, tais como, vitaminas e minerais, além de ser fonte de energia e propiciarem ao organismo excelentes propriedades funcionais. A quantidade de água presente interfere na qualidade dos produtos alimentícios, uma vez que, diminui o tempo de prateleira, provocando a não conservação dos alimentos. Com isso, é de fundamental importância a utilização de alguns métodos de secagem para redução do teor de umidade, implicando numa redução de volume, e consequentemente, redução na quantidade de embalagem por unidade de alimento, de maneira a diminuir os custos com transporte e armazenamento. A evaporação da água presente nos alimentos se dá por dois processos, sendo uma do ambiente para o interior do produto (transferência de energia) e do interior do produto para a superfície da amostra (transferência de massa).

O modelo matemático de Fick, é utilizado para analisar os coeficientes difusionais, enquanto os modelos de Page e Thompson, são utilizados visando avaliar o comportamento da cinética de secagem dos produtos alimentícios, assim como, o ajuste proporcionado por cada modelo. Já os modelos matemáticos de Lozano e Ratti, são empregados para averiguar o encolhimento (S) em função da razão de umidade (RU). O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) obtido em cada modelo matemático, é uma resposta ao ajuste apresentado por cada modelo.

#### **4. METODOLOGIA**

A pesquisa foi conduzida nos laboratórios pertencentes ao Departamento de Engenharia de Materiais (DEMat) e no Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) no Centro de Tecnologia (CT) do Campus I da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), na cidade de João Pessoa-PB, no período de julho a setembro de 2018.

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Aspersão e Purificação de Minerais Argilosos (LAPAMA), no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LMC), ambos do

Departamento de Engenharia de Materiais e no Laboratório de Solidificação Rápida (LSR) do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

#### **4.1. Matéria-prima**

##### **4.1.1. Obtenção e seleção da matéria-prima**

A matéria-prima utilizada foi a batata-doce (Figura 3), proveniente do comércio local do município de João Pessoa-PB. As batatas-doces foram selecionadas levando-se em consideração a uniformidade, a ausência de manchas e não existência do processo de deterioração.

Figura 3– Ilustração da batata-doce



Fonte: MF Rural (2016).

##### **4.1.2. Higienização, descascamento e fatiamento**

Nesta etapa, as batatas-doces foram lavadas em água corrente, visando a remoção das sujidades grosseiras, em seguida, as mesmas foram descascadas manualmente com o auxílio de faca de aço inoxidável. Após esta etapa, seguiram para etapa seguinte, o fatiamento, onde foram cortadas em fatias circulares com espessura de aproximadamente 1 mm, utilizando um faca e um paquímetro para auxiliar na precisão do corte, tais fatias foram



envolvidas no papel alumínio, deixando apenas a parte superior em aberto para que a evaporação do teor de umidade se desse apenas pela superfície superior.

## **4.2. Métodos**

### **4.2.1. Secagem**

#### **4.2.1.1. Secagem por estufa de convecção**

As fatias de batata-doce foram secas utilizando uma estufa de convecção da marca SP Labor e modelo SP-100/180.

Nesta técnica de secagem, as amostras foram secas utilizando as condições de temperaturas do ar de secagem, equivalentes a 60, 65 e 70 °C, sendo uma amostra para cada temperatura, a espessura referente a cada fatia consistiu em aproximadamente 1 mm. Após a estufa atingir a temperatura almejada, o processo de secagem iniciou-se, de modo, a realizar todo um acompanhamento da perda de massa através de pesagens utilizando uma balança semi-analítica da marca Shimadzu e modelo AX 200, com precisão de 0,01 g. Além disso, foi realizado também, a aferição do diâmetro das fatias com posições padronizadas através de um paquímetro digital, com o propósito de calcular o encolhimento. O procedimento de secagem consistiu em retirar as amostras do secador em intervalos de 15 minutos, na primeira hora, e posteriormente, de 30 minutos, até atingir peso constante.

Durante todo o experimento, a temperatura do ar se manteve em 25 °C e a umidade relativa em torno de 80 %.

#### **4.2.1.2. Secagem por estufa com circulação forçada**

As fatias da batata-doce foram secas utilizando uma estufa de circulação forçada de ar, da marca SP Labor e modelo SP-102/27. Tal circulação proporciona a perfeita

homogeneização da temperatura. As condições de secagens foram as mesmas utilizadas na estufa de convecção.

#### **4.2.1.3. Secagem por *refractance window***

A secagem por *refractance window* foi realizada em um equipamento adaptado conforme a literatura de Zotarelli (2014), com algumas modificações, usando um banho ultratermostático da marca SP Labor, com o apoio de um exaustor montado em laboratório com a finalidade de prevenir que o vapor de água viesse a condensar próximo as fatias e bandejas (20x12x4,5cm) confeccionada com filme de poliéster Cristal (MYLAR).

As variáveis de processo utilizadas foram: temperaturas do ar de secagem 60, 65 e 70 °C, com espessura de corte aproximado de 1 mm, conforme as mesmas condições de secagem empregadas nas técnicas citadas.

#### **4.2.1.4. Secagem por micro-ondas**

A radiação é uma forma de energia que se propaga como uma onda eletromagnética. Dentro do espectro eletromagnético, a radiação de micro-ondas é aquela caracterizada pelo intervalo de frequências entre 300MHz e 300GHz. Ela se propaga através de objetos e pode apresentar fenômenos de reflexão, transmissão e absorção. As micro-ondas são refletidas por superfícies metálicas (condutores) e refratadas por materiais dielétricos (pouco condutores). A propriedade intrínseca mais importante dessa forma de energia para a tecnologia de alimentos é a absorção volumétrica por materiais dielétricos, em forma de calor (ENGELDER e BUFFLER, 1991). Esta propriedade resulta em tempos de processamento mais curtos, maior rendimento do produto final e, usualmente, em qualidade superior à encontrada mediante técnicas convencionais do processamento (DECAREAU e PETERSON, 1986).

As fatias da batata-doce foram secas utilizando o micro-ondas da marca Panasonic e modelo NN-ST357WRPK. Com o auxílio do amperímetro mediu-se a corrente e calculou três percentuais diferentes de potência média, sendo de 1008,04, 1147,08 e 1320 88 W para

realização da secagem. A espessura da fatia é também de aproximadamente 1 mm. O micro-ondas controla a potência por tempo, com isso, utilizando a potência de 1008,04 W o intervalo de tempo foi 12 segundos ligado, e 9 segundos desligado, para a potência de 1147,08 W o intervalo se dá em 14 segundos ligado e 7 segundos desligado, enquanto para a potência de 1320,88 W o intervalo de tempo ligado e desligado é de 16 segundos e 5 segundos, respectivamente. Nota-se que, a medida em que aumenta a potência (W), aumenta o tempo ligado e diminui o tempo desligado.

Durante a secagem se fez o acompanhamento da perda de massa das fatias de batata-doce. Assim como nas demais técnicas de secagem, foi aferido os diâmetros de cada fatia para obter os respectivos valores de encolhimentos. As amostras foram retiradas em intervalos de vinte segundos por aproximadamente cinco minutos para realização das pesagens, até atingir peso constante.

#### **4.2.1.5. Secagem por análise termogravimétrica (TGA)**

A caracterização térmica por análise termogravimétrica (TGA) é uma técnica na qual é feito o monitoramento da variação de massa de uma amostra em função da temperatura ou do tempo, com objetivo de avaliar o comportamento e estabilidade térmica da batata-doce.

Foi utilizado um analisador termogravimétrico da marca SHIMADZU, modelo DTG 60H, com taxa de aquecimento de 10°C/min e faixa de temperatura de 60, 65 e 70 °C. A aquisição dos valores dos diâmetros foi realizada a cada cinco minutos até a estabilização da perda de massa.

#### **4.2.2. Ajuste por modelos matemáticos**

Para a efetuação da modelagem matemática aos dados experimentais das cinéticas de secagem, foram empregados os modelos de difusão de Fick desconsiderando o efeito do encolhimento (Equação 3), e considerando o encolhimento (Equação 4), com o propósito de obter os coeficientes de difusão. Neste modelo, utilizou-se quatro termos na série, com o

propósito de obter valores para o coeficiente “A” próximos a  $(8/\pi^2) = 0,810$ . Além disso, utilizou-se também os modelos de Page (Equação 8) e Thompson (Equação 9).

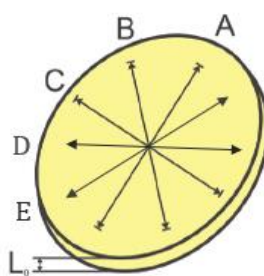
Os ajustes dos modelos aos dados experimentais de secagem foram realizados mediante procedimento de regressão não linear do pacote Statistica (StatSoft, versão 7). Os critérios de escolha dos melhores ajustes foram baseados na determinação do coeficiente de regressão ( $R^2$ ), gerado pelo próprio *software* estatístico.

#### 4.2.3. Encolhimentos

Para alcance do encolhimento (S), necessitou-se calcular os volumes iniciais e de equilíbrio (Equação 10) que por sua vez, são obtidos multiplicando a área pela espessura ( $L_0$ ) da amostra, a qual se manteve em aproximadamente 1 mm. Com o auxílio do paquímetro digital, pôde-se medir o diâmetro em cinco pontos definidos para obtenção da média, e assim, determinar a área das amostras, conforme ilustra a Figura 4.

Após obtenção do encolhimento (S), os dados foram aplicados a modelos matemáticos de Lozano e Ratti.

Figura 4 - Coordenadas aferidas para a obtenção dos volumes das amostras, sendo L a espessura da fatia e A, B, C, D e E os diâmetros aferidos.



Fonte: Leite et al. (2015).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Modelagem da cinética de secagem

#### 5.1.1. Modelo de Fick

Na análise do comportamento matemático descrito por um modelo, utiliza-se o parâmetro estatístico denominado coeficiente de determinação ( $R^2$ ), que avalia o que realmente acontece na prática. Na Tabela 3 estão listados os valores referentes aos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e os coeficientes de difusão efetiva ( $D_{ef}$ ) em três temperaturas diferentes, 60, 65 e 70 °C para as técnicas de secagem, em estufa de convecção, estufa de circulação, *refractance window*, micro-ondas (1008, 04, 1147,08 e 1320, 88 W) e análise termogravimétrica (TG).

Tabela 3- Coeficientes de difusão efetiva ( $D_{ef}$ ) e de determinação ( $R^2$ ) calculados para a verificação de ajuste dos modelos matemáticos ajustados aos valores experimentais obtidos nas temperaturas de 60 °C, 65 °C e 70 °C e nas potências 1008, 04, 1147,08 e 1320, 88 W.

		Parâmetros					
Técnicas de secagem		Sem encolhimento			Com encolhimento		
		A	$R^2$	$D_{ef} \times 10^{-10} \text{ (m}^2/\text{s)}$	A	$R^2$	$D_{ef} \times 10^{-10} \text{ (m}^2/\text{s)}$
<b>Estufa de Convecção</b>	60 °C	0,874396	0,99603	1,56	0,946858	0,96568	1,53
	65 °C	0,863880	0,99550	1,59	0,863691	0,99552	1,58
	70 °C	0,863880	0,99771	2,36	0,867439	0,99015	1,84
<b>Estufa de Circulação</b>	60 °C	0,855021	0,99984	3,54	0,874280	0,99167	2,56
	65 °C	0,859065	0,99706	4,70	0,870842	0,98470	3,65
	70 °C	0,853394	0,99939	5,60	0,854004	0,99980	4,43

<b>Refractance Window</b>	60 °C	0,859925	0,99923	2,54	0,892178	0,98595	1,51
	65 °C	0,862718	0,99656	3,05	0,880716	0,98530	2,31
	70 °C	0,869019	0,98746	3,49	0,86972	0,98686	3,28
<b>Micro-ondas</b>	1008,04 W	0,878248	0,98583	96,48	0,934668	0,93950	71,48
	1147,08 W	0,889116	0,97724	114,04	0,939108	0,92825	87,95
	1320,88 W	0,842501	0,98880	150,35	0,84713	0,98429	95,17
<b>TG</b>	60 °C	1,188101	0,93794	7,67	0,955026	0,86516	5,88
	65 °C	1,037167	0,98579	11,04	0,875782	0,98119	9,61
	70 °C	0,993087	0,99456	12,64	0,875495	0,97958	10,02

Fonte: Autoria Própria, 2018.

Conforme observado na Tabela 3, verifica-se que o modelo difusional não considerando o encolhimento apresentou coeficientes de determinação ( $R^2$ ) elevados em detrimento aos  $R^2$  obtidos quando se considera o encolhimento. Padro (1988), também constatou resultados como este.

Segundo Madamba et al., (1996) e Martinazzo et al., (2007), os valores de  $R^2$  quanto mais próximos de 1, denotam um excelente ajuste dos modelos para representação da cinética de secagem.

Considerando que as fatias de batata doce se aproximam de uma geometria de placa plana, verifica-se que, os valores do parâmetro “A” se aproximam muito do valor teórico  $8/\pi^2=0,810$  para placas planas, exceto para a secagem em TG, pois na secagem por termogravimetria (TG), existe inicialmente um período de aquecimento, para depois, atingir o período de taxa constante.

Observa-se que para secagem em estufa de convecção, os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) variam de 99,550 a 99,771 % sem considerar o encolhimento e, 96,5668 % a 99,552 %, considerando o encolhimento. Os coeficientes de difusão são de 1,56, 1,59 e  $2,36 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  (sem encolhimento) e 1,53, 1,58 e  $1,84 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  (com encolhimento) para as temperaturas de 60, 65 e 70 °C, respectivamente.

Na modelagem da perda de umidade da banana durante o processo de secagem, tal fruta, apresentou difusividade elevada, garantindo um menor tempo de secagem. Assim aborda, o Wojeicchowski, (2015). Resultados como este, podem ser vistos na secagem utilizando o micro-ondas como método de secagem, uma vez que, o mesmo apresentou

coeficientes de difusão elevados para os três percentuais de potência, 1008,04 W, 1147,08 W e 1320,88 W. Além de um tempo de secagem muito baixo.

Na estufa de circulação, os coeficientes de difusão são superiores ao da estufa de convecção, variando entre  $3,54$  a  $5,60 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  (sem encolhimento) e  $2,56$  a  $4,43 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  (com encolhimento). Os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) são equivalentes a 99,984 %, 99,706 % e 99,939%, sem encolhimento e, 99,167 %, 98,470 % e 99,980 %, com encolhimento.

Estudo realizado na cinética de secagem em camada fina da polpa cladódios de palma de palma forrageira (*Opuntia ficus indica* Mill) em estufa com circulação forçada, encontraram valores de coeficientes de determinação ( $R^2$ ) superiores a 99 % (MARTINS et al., 2014). Concordante com esta observação, o estudo realizado por Sousa et al., (2011) encontraram ( $R^2$ ) elevados, verificando que o modelo de Fick se ajusta aos dados obtidos durante a secagem da folha de oiti.

Na secagem utilizando o *refractance window*, a difusividade foi menor em relação a estufa de circulação, uma vez que, apresentou coeficientes de difusão análogos a  $2,54 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $3,05 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  e  $3,49 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  (sem encolhimento) e  $1,51 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $2,31 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  e  $3,28 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  (com encolhimento). Nota-se também que os  $R^2$  se equivalem a 99,923 %, 99,656 % e 98,746 %, sem encolhimento e 98,595 %, 98,530 % e 98,686 %, com encolhimento.

Averigua-se que, na secagem utilizando o micro-ondas os coeficientes de difusão foram muito elevados em relação a todas as técnicas de secagem, sendo de 96,48, 114,04 e  $150,35 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ , sem encolhimento e 71,48, 87,95 e  $95,17 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ , com encolhimento. Os  $R^2$  variaram entre 97,724 a 98,880 % (sem encolhimento) e 92,825 a 98,429 % (com encolhimento). Com base na literatura, não se encontrou referências utilizando este método.

Para secagem em TG, os coeficientes de difusão são de 7,67, 11,04 e  $12,64 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  com  $R^2$  de 93,794, 98,579 e 99,456 %, sem considerar o encolhimento e, 5,88, 9,61 e  $10,02 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  com  $R^2$  de 86,516, 98,119 e 97,958 %, considerando o encolhimento. Para este método de secagem, utilizando o modelo matemático de Fick, não foi encontrado referências na literatura. A literatura não aborda referências a respeito da utilização deste método aplicado a modelo matemático de Fick.

Conforme já apresentado, o micro-ondas apresentou maiores coeficientes difusionais ( $D_{ef}$ ), de modo, a reduzir o tempo de secagem. Sendo assim, mais eficiente do que a estufa de circulação, a TG, o *refractance window* e por último, a estufa de convecção.

Essa variação de difusividade se deve ao fato de, na estufa de convecção os fenômenos atuantes são, condução e convecção. Na superfície da amostra a pressão de vapor

se eleva, conduzindo uma difusividade baixa, pois o teor de umidade retirado está em meio a um ambiente úmido, tendo em vista, que não há circulação. Na estufa de circulação, também existe condução e convecção, porém o ar é circulante, com isso, haverá a remoção da camada de vapor, deixando a amostra seca, proporcionando uma difusividade maior. No *refractance window*, os mecanismos de transferência de calor são, radiação, convecção e condução. O mecanismo se dá primeiramente pelo aquecimento da água, em seguida esse calor é transmitido para o filme e posteriormente para a amostra. Então, a superfície da amostra encontra-se fria, embora haja circulação, o ar é frio. No micro-ondas, a temperatura é próxima a temperatura de ebulição da água. Este equipamento possui um sistema de exaustor, possibilitando ao ambiente baixo teor de umidade. Por isso, o coeficiente de difusão é extremamente elevado. Na TG, a difusividade é elevada, pois a massa da amostra é muito pequena. A secagem por TG se comportou adequadamente, tendo em vista que, a massa é extremamente reduzida, e conforme a redução da massa, maior o coeficiente de difusão ( $D_{ef}$ ).

É notório que os valores da difusividade aumentaram com a elevação da temperatura de secagem. Doymaz et al., (2006) em estudo sobre a secagem de folhas de endro (*Anethum graveolens* L.), encontraram valores de  $6,693 \times 10^{-10}$ ,  $9,205 \times 10^{-10}$  e  $1,434 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  para as temperaturas de 50, 60 e 70 °C, respectivamente.

Segundo Akpınar (2006) obteve coeficientes de difusão entre  $4,53 \times 10^{-12}$  a  $7,04 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  na avaliação da cinética de secagem para as espécies de menta (*Mentha* sp.), salsinha (*Petroselinum crispum*) e manjeriço (*Ocimum basilicum*).

De acordo com Zogzas et al. (1996), os produtos alimentícios encontram-se na faixa de difusividade de  $10^{-11}$  a  $10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ .

Para cada método de secagem, o tempo necessário para remoção total do teor de umidade e assim, atingir o equilíbrio foram diferentes, conforme Tabela 4, (Apêndice I).

Tabela 4 - Tempo total de secagem exibido por cada técnica nas temperaturas de 60 °C, 65 °C e 70 °C e nas potências 1008,04, 1147,08 e 1320,88 W.

<b>Técnicas de secagem</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Tempo de secagem (minutos)</b>
<b>Estufa de convecção</b>	60 °C	270
	65 °C	240
	70 °C	210



<b>Estufa de circulação</b>	60 °C	180
	65 °C	150
	70 °C	120
<b>Refractance window</b>	60 °C	180
	65 °C	150
	70 °C	138
<b>Micro-ondas</b>	1008,04 W	2,5
	1147,08 W	2,33
	1320,88 W	2,16
<b>Termogravimetria (TG)</b>	60 °C	39
	65 °C	33
	70 °C	26

Fonte: Autoria própria, 2018.

### 5.1.2. Modelo de Page

Para modelagem matemática a partir do modelo de Page, utilizou-se a Equação 8, para obtenção do ajustamento aos dados experimentais. O modelo matemático de Page apresentou ajustes com elevado coeficiente de determinação ( $R^2$ ), sendo superiores a 99 %, conforme especifica a Tabela 5.

Tabela 5 - Valores dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) calculados para a verificação de ajuste do modelo matemático de Page aos valores experimentais obtidos nas secagens sob temperaturas de 60, 65 e 70 °C e potências de 1008, 04, 1147,08 e 1320, 88 W para as diferentes técnicas de secagens.

<b>Parâmetros</b>		
<b>Técnicas de secagem</b>		<b><math>R^2</math></b>
<b>Estufa de convecção</b>	60 °C	0,99875
	65 °C	0,99847
	70 °C	0,99993
<b>Estufa de circulação</b>	60 °C	0,99974
	65 °C	0,99986

	70 °C	0,99990
	60 °C	0,99971
<b>Refractance Window</b>	65 °C	0,99948
	70 °C	0,99894
	1008,04 W	0,99300
<b>Micro-ondas</b>	1147,08 W	0,99936
	1320,88 W	0,99561
	60 °C	0,99960
<b>TG</b>	65 °C	0,99898
	70 °C	0,99970

Fonte: Autoria Própria, 2018.

De acordo com a Tabela 5, verifica-se que os valores referentes ao coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para todas as técnicas de secagem são próximos de 1, o que discerne um grau de ajuste adequado aos dados experimentais.

É possível identificar que a secagem por estufa de convecção proporcionou coeficientes de determinação ( $R^2$ ) de 99,875 %, 99,847 % e 99,993 % para as temperaturas de 60, 65 e 70 °C, respectivamente.

Soares et al., (2016) avaliaram os modelos de processos de secagem da jabuticaba *in natura* com o uso de indicadores de desempenho, observando coeficientes de determinação elevados ( $R^2$ ) para a secagem na estufa de convecção, aplicando o modelo de Page.

A estufa de circulação apresentou coeficientes de determinação ( $R^2$ ) equivalentes a 99,974 % para a temperatura de 60 °C, 99,986 % para a temperatura de 65 °C e 99,990 % a temperatura de 70 °C.

Estes resultados estão de acordo com a pesquisa de Araujo et al., (2017), ao estudarem a modelagem matemática da secagem dos frutos de amendoim em camada delgada utilizando a estufa de circulação, observaram que o modelo de Page se ajustou os dados experimentais, pois apresentou coeficientes de determinação superiores a 99 % para as temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C, podendo ser recomendado e utilizado para a representação do fenômeno de cinética de secagem dos frutos de amendoim em camada delgada.

O mesmo fato foi observado por Reis et al. (2011), na secagem de pimenta cumari, verificando que a equação Page proporcionou os melhores ajustes comprovados pelos valores de  $R^2$  acima de 0,99.

Na secagem por *refractance window*, o ajuste aos dados experimentais também foi satisfatório, pois os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) são análogos a 99,971 %, 99,948 % e 99,894 %. Para este método de secagem, não consta referências na literatura.

Utilizando o micro-ondas como fonte de secagem, nota-se que o mesmo exibiu coeficientes de determinação ( $R^2$ ) elevados, sendo, portanto, equivalente a 99,3 %, 99,936 % e 99,561 %, implicando mais uma vez, um ajuste adequado. Segundo Pereira (2007), a equação proposta por Page para descrever a cinética de secagem de alimentos no micro-ondas obteve resultados semelhantes.

Por fim, analisando a secagem por TG, averigua-se que esta técnica concedeu coeficientes de determinação análogos a 99,96 %, 99,898 % e 99,97 %, conferindo ajuste adequado do modelo para com os dados adquiridos durante o período de secagem. Na literatura não constam trabalhos aplicando o modelo de Page para os métodos de secagem em *refractance window*, micro-ondas e TG.

### 5.1.3. Modelo de Thompson

Mediante a Equação 9, estabelecida por Thompson, pôde-se ajustar os dados experimentais com o modelo, a fim, de se obter os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) para cada técnica de secagem sob temperaturas de 60, 65 e 70 °C e potências de 1008, 04, 1147,08 e 1320, 88 W para secagem em micro-ondas. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Valores dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) calculados para a verificação de ajuste do modelo matemático de Thompson aos valores experimentais obtidos nas secagens sob temperaturas de 60, 65 e 70 °C e potências de 1008,04, 1147,08 e 1320,88 W, para as diferentes técnicas de secagens.

<b>Técnicas de secagem</b>		<b>Parâmetros</b>	<b><math>R^2</math></b>
<b>Estufa de convecção</b>	60 °C		0,99875
	65 °C		0,99814
	70 °C		0,99902
<b>Estufa de circulação</b>	60 °C		0,99961
	65 °C		0,99856
	70 °C		0,99983
<b>Refractance Window</b>	60 °C		0,99598
	65 °C		0,99900
	70 °C		0,99258
<b>Micro-ondas</b>	1008,04 W		0,99206
	1147,08 W		0,98811
	1320,88 W		0,99518
<b>TG</b>	60 °C		0,91823
	65 °C		0,98628
	70 °C		0,99707

Fonte: Autoria Própria, 2018.

A partir da Tabela 6, é possível verificar que as técnicas de secagem exibiram coeficientes de determinação ( $R^2$ ) superiores a 98 %, exceto a secagem por TG na temperatura de 60 °C.

Observa-se que a secagem por estufa de convecção exibiu coeficientes de determinação ( $R^2$ ) elevados, sendo exatamente, 99,875 %, 99,814 % e 99,902 % para as temperaturas de 60, 65 e 70 °C.

Já, a secagem via estufa de circulação para as temperaturas de 60, 65 e 70 °C apresentou coeficientes de determinação ( $R^2$ ) de 99,961%, 99,856% e 99,983%, respectivamente. Com base no exposto, a secagem por estufa de circulação obteve maiores coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e com isso, melhor ajuste experimental.

Estes resultados corroboram com os resultados obtidos por Wang et al. (2007), Menges e Ertekin (2006), Sacilik e Konuralp (2006) e Gurjão (2006), no estudo da cinética de secagem de maçã, maçã variedade ouro, tomate orgânico e polpa de tamarindo, empregando a estufa de circulação como método de secagem e o modelo de Thompson como melhor ajuste.

Na secagem por *refractance window*, os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) equivalem-se a 99,598 %, 99,900 % e 99,258 %, o que resulta também, um ajuste satisfatório aos dados experimentais.

Agora, avaliando a secagem por micro-ondas, verifica-se que os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) correspondem a 99,206, 98,811 e 99,518 % admitindo ajuste experimental eficiente.

Verificando os coeficientes de determinação obtidos por TG, observa-se que as temperaturas de 65 e 70 °C apresentaram um bom ajuste, uma vez que, exibiram  $R^2$  superiores a 98 %, em contrapartida, a temperatura de 60 °C apresentou  $R^2 = 91$  %. Conforme já descrito anteriormente, essa redução no coeficiente de determinação para a temperatura de 60 °C se dá por conta do período de aquecimento.

Para os métodos de estufa de convecção, *refractance window*, micro-ondas e TG, não foram encontrados estudos na literatura empregando o modelo de Thompson.

De modo geral, verifica-se que todos os modelos se ajustam aos dados obtidos para cada método de secagem. É importante ressaltar que, a temperatura exerce grande influência sobre a velocidade de secagem em cada método estudado, sendo o tempo de secagem menor quando a temperatura aumenta, pois, o aumento desta variável resulta em maior excitação das moléculas de água no interior do material, com consequente aumento da velocidade de secagem nestas condições.

#### **5.1.4. Encolhimento**

Pode-se constatar, através das Tabelas 7 e 8 os modelos matemáticos de Lozano e Ratti para o encolhimento. Nota-se que ambos os modelos apresentaram elevados coeficientes de determinação ( $R^2$ ). Porém, o modelo de Ratti, por ser uma equação não linear e com maior número de parâmetros, apresenta ajuste com maior  $R^2$ . Comportamento semelhante a este foram encontrados por Goneli et al., (2009), no estudo da cinética de secagem dos grãos de café descascados. As curvas equivalentes a tais modelos, constam no Apêndice II.

Tabela 7 - Valores dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ), calculados para a verificação do ajuste do modelo matemático de Lozano para as diferentes técnicas de secagem sob temperaturas de 60, 65 e 70 °C e potências de 1008, 04, 1147,08 e 1320, 88 W.

Parâmetros		
Técnicas de secagem		$R^2$
Estufa de convecção	60 °C	0,95484
	65 °C	0,88160
	70 °C	0,92081
Estufa de circulação	60 °C	0,98753
	65 °C	0,98876
	70 °C	0,99020
Refractance Window	60 °C	0,99044
	65 °C	0,94008
	70 °C	0,87604
Micro-ondas	1008,04 W	0,97448
	1147,08 W	0,97423
	1320,88 W	0,99125
TG	60 °C	0,76671
	65 °C	0,78130
	70 °C	0,96661

Fonte: Autoria própria, 2018.

A partir da Tabela 7, verifica-se que a estufa de convecção, apresentou dados com ajustes adequados ao modelo de Lozano, pois exibiu coeficiente de determinação  $R^2$  superior 88 %.

Na secagem por estufa de circulação, observa-se que os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) são elevados, sendo especificamente, 98, 753 %, 98, 876 % e 99,020 %, apresentando assim, um grau de ajuste eficiente do modelo para com os dados experimentais.

Utilizando como meio de secagem, o *refractance window*, nota-se que para este método, os dados experimentais exibiram ajuste adequado, uma vez que, apresentaram  $R^2$  variando entre 87, 604 % a 99, 044 %.

Para secagem em micro-ondas, os coeficientes de determinação são equivalentes ( $R^2$ ) 97,448, 97,423 e 99,125 %, denotando também, um ajuste eficiente ao modelo matemático.

Nota-se que na secagem por TG, os ( $R^2$ ) variaram entre 76,671 % a 96,661 %. É possível identificar que apenas a secagem utilizando a temperatura de 70 °C obteve um ajuste adequado ao modelo de Lozano. Os valores dos coeficientes de determinação estão baixos devido, provavelmente a operacionalização, já que as amostras são muito pequenas e esfriam rapidamente durante a aferição do diâmetro.

Kilpatrick et al., (1955) e Leite et al. (2015), também utilizaram estes modelos para o estudo do encolhimento (S) em função da razão de umidade (RU).

Agora, analisando o efeito do encolhimento para o modelo matemático de Ratti (Tabela 7), percebe-se que para todos os métodos de secagem os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) foram superiores a 98 %, exceto, para estufa de convecção e para o *refractance window* na temperatura de 65 °C.

Tabela 8 - Valores dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ), calculados para a verificação do ajuste do modelo matemático de Ratti para as diferentes técnicas de secagem sob temperaturas de 60, 65 e 70 °C e potências de 1008, 04, 1147,08 e 1320, 88 W.

Parâmetros		
Técnicas de secagem		$R^2$
Estufa de convecção	60 °C	0,98677
	65 °C	0,97825
	70 °C	0,99171
Estufa de circulação	60 °C	0,99861
	65 °C	0,99761

	70 °C	0,99823
<b>Refractance Window</b>	60 °C	0,99834
	65 °C	0,96857
	70 °C	0,99744
<b>Microondas</b>	1008,04 W	0,99522
	1147,08 W	0,99735
	1320,88 W	0,99331
<b>TG</b>	60 °C	0,99548
	65 °C	0,98866
	70 °C	0,99513

Fonte: Autoria própria, 2018.

Com a Tabela 8, observa-se que para estufa de convecção os coeficientes de determinação foram equivalentes a 98, 677 %, 97, 825 % e 99, 171 %, nota-se que os dados obtidos experimentalmente se ajustaram ao modelo de Ratti.

Para secagem em estufa de circulação, nota-se que os valores referentes aos coeficientes de determinação foram iguais a 99, 861 %, 99, 761 % e 99, 823 %, conferindo um bom ajuste ao modelo matemático.

Utilizando o *refractance window* como método de secagem, os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) são equivalentes a 99,834 %, 96,857 % e 99, 744 %.

Os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) usando o micro-ondas como fonte de secagem, variaram entre 99,331 % a 99,735 % denotando um ajuste experimental satisfatório ao modelo.

Na secagem por TG os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) foram equivalentes a 99,548 %, 98,866 % e 99, 513 %, discernindo mais uma vez que os resultados obtidos durante o período de secagem utilizando este método, resultam em ajustes adequados.

Analizando os modelos matemáticos para o efeito do encolhimento, observa-se que o modelo de Ratti apresentou maior ajuste aos dados experimentais em detrimento do modelo proposto por Lozano, pois trata-se de um polinômio de terceira ordem. No início da etapa de secagem, o encolhimento depende linearmente da remoção de água, em seguida, a quantidade de água presente na amostra vai reduzindo, passando de um estado elástico (etapa linear) para um estado inteiramente rígido, deixando de ser flexível. Contudo, a razão de encolhimento diminui até atingir a umidade de equilíbrio (LOPES, 2013). Analisando o fenômeno do



encolhimento de cereja doce, Ochoa et al., (2007) encontraram comportamento semelhante a este. Como já mencionado, Leite et al., (2015) e Kilpatrick et al., (1955) fizeram uso desses modelos para avaliar a contração volumétrica de produtos alimentícios.

Em linhas gerais, todos os modelos matemáticos que descrevem a cinética de secagem da batata-doce se ajustaram aos diferentes métodos de secagem, visto que os modelos apresentaram coeficientes de determinação ( $R^2$ ) superiores a 86 %. Todavia, o modelo de Page foi o que mais se ajustou aos dados experimentais, tendo em vista que, o mesmo exibiu coeficientes de determinação ( $R^2$ ) superiores a 99 %.

Em termos de difusividade, a secagem por micro-ondas apresentou coeficientes de difusão muito elevados em relação a todos os métodos de secagem, sendo de 96,48, 114,04 e  $150,35 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ , sem encolhimento e 71,48, 87,95 e  $95,17 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ , com encolhimento.

Para os modelos matemáticos de encolhimento, o modelo de Lozano apresentou coeficientes de determinação ( $R^2$ ) superiores a 76 % para todos os métodos de secagem. Já o modelo de Ratti, exibiu  $R^2$  superiores a 96 %. Sendo assim, o modelo não linear de Ratti o mais ajustado aos dados obtidos experimentalmente.

A partir da aplicação dos modelos matemáticos, nota-se que o método de secagem em micro-ondas apresentou um menor tempo de secagem, sendo assim, um método eficiente.

## CONCLUSÃO

Com os objetivos propostos, os dados experimentais obtidos e a discussão dos resultados alcançada, algumas conclusões podem ser formuladas

- Para cada método de secagem foi possível obter as curvas de secagem em função do tempo.
- Analisando as curvas de cinética de secagem, é notório que a temperatura e o método de secagem utilizado exerce grande influência no processo, pois, temperaturas elevadas reduzem o tempo total de secagem. A secagem em micro-ondas com potência de 1320,88 W se mostrou mais eficiente, pois apresentou o menor tempo de secagem.
- Avaliando os métodos de secagens, nota-se que os modelos matemáticos de Fick, Page e Thompson e o modelo de Ratti apresentaram maior ajuste ( $R^2$ ) para a secagem em estufa de circulação.
- No que diz respeito à difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), foi possível constatar a influência da temperatura sob efeito do encolhimento ou não, constatando-se que com o aumento da temperatura a difusividade efetiva aumenta, considerando ou não o encolhimento.

## REFERÊNCIAS

AGRIANUAL. Anuário da Agricultura Brasileira. São Paulo: FNP, 2006, 512p. AGUIRRE, J. M. de. Desidratação de hortaliças. In: AGUIRRE, J.M.; GASPARINO FILHO, J. Desidratação de Frutas e Hortaliças. (Manual Técnico). Campinas: ITAL, 2002, 205p.

AGUERRE, R.J.; GABITTO, J.F.; CHIRIFE, J. Utilization of Fick's second law for the evaluation of diffusion coefficients in food process controlled by internal diffusion. *Journal of Food Technology*, n.20, p.623-629, 2002.

AKPINAR, E. K. Mathematical modelling of thin layer drying process under open sun of some aromatic plants. *Journal of Food Engineering*, London, v.77, n.4, p.864-870, 2006.

ALCINA, O. L. S.; SILVA, O. S.; BRASILEIRO, M. N. Drying kinetics of West Indian Cherry. In: INTER-AMERICAN DRYING CONFERENCE, 1997, Itu. Proceedings... Itu: IADC, 1997. p. 434-440.

ALMEIDA, C. A.; GOUVEIA, J. P. G; ALMEIDA, F. A.; SILVA, L. F. H. Avaliação da cinética de secagem em frutos de acerola. *Revista de Biologia e Ciências da Terra*, v.6, n.1, 2006.

ALMEIDA, D. P.; RESENDE, O.; COSTA, L. M.; MENDES, U. C.; SAL, J. F. Cinética de secagem do feijão adzuki (*Vigna angularis*). *Global Science Technology*, v.2, p.72-83, 2009.

ALVES, B. A., LUIZ, M. R, AMORIM, J. A., VIEIRA, H. M., GURGEL, J. M., 2012. "Modelos matemáticos na cinética de secagem do abacate (Percia Americana Mill)". VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, (CONEM). São Luís – Maranhão. Brasil.

ARAÚJO, W. D.; GONELI, A. L. D.; CORRÊA, P. C.; FILHO, C. P. H.; MARTINS, E. A. S. Modelagem matemática da secagem dos frutos de amendoim em camada delgada. *Revista Ciência Agronômica*, v. 48, n. 3, p. 448-457, jul-set, 2017.

AZOUBEL, P. M., CABRAL, A. C. P. L. F., SILVA, M. D. B., OLIVEIRA, S. B., 2008, “Modelagem matemática da cinética de secagem de manga (Tommy Atkins)”. XV Congresso Brasileiro de Engenharia Química. Recife-PE-Brasil.

AZZOUZ, S., JOMMA, W., BELGHITH, A., 1998, “Drying Kinect equation of single layer of grapes”. In: International Drying Symposium, 11, Halkidiki, Greece. Proceedings...Greece: A. S. Mujumdar, v. B., p. 888-997.

BABALIS, S. J., VELESSIOTIS, V. G., 2004, “Influence conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs”. Journal of Food Engineering, v. 65, p. 449-458.

BARBANTI, D.; MASTROCOLA, D.; SEVERINI, C. Air drying of plums. A comparison among twelve cultivars. *Sciences des Aliments*, n. 14, p. 61 – 73, 1994.

BARBOSA, F. F.; MELO, E. C.; SANTOS, R. H. S.; ROCHA, R. P.; MARTINAZZO, A. P.; RADÜNZ, L. L.; GRACIA, L. M. N. Evaluation of mathematical models for prediction of thinlayer drying of Brazilia lemon-scented verbena leaves (*Lippia alba* (Mill) N.E. Brown). *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, v.9, p.73-82, 2007.

BARRETO, S.M.; PINHEIRO, A.R.O.; SICHIERI, R.; MONTEIRO, C.A.; BATISTA FILHO, M.; SCHIMIDT, M.I.; LOTUFO, P.; ASSIS, A.M.; GUIMARÃES, V.; RECINE, E.G.I.G.; VICTORA, C.G.; COITINHO, D.; PASSOS, V.M.A. Análise da estratégia global para alimentação, atividade física e saúde, da Organização Mundial da Saúde. *Epidemiologia e Serviços de Saúde*, Brasília, v.14, n.1, p.41-68, 2005.

BORÉM, F. M.; ANDRADE, E, T.; Pós-colheita do café. 1. ed. Lavras: Editora UFLA, 2008. 631p.

BORGES, S. V. et al. Secagem de fatias de abóboras (*Cucurbita moschata*, L.) por convecção natural e forçada. *Ciências e Tecnologias de Alimentos*, Campinas, v. 28, p. 245-251, dez. 2008.

BRENNAN, J.G.; WANG, N.A. A mathematical model of simultaneous heat and moisture transfer during drying of potato. *Journal of Food Engineering*. v.24, p.47-60, 1980.

BROD, F. P. R., 2003, “Avaliação de um secador vibro-fluidizado”. Universidade de Campinas. Campinas, SP-Brasil. p. 20. Tese de Doutorado.

BROD, F.P.R.; ALONSO, L.F.T.; PARK, K.J. Secagem de produtos agrícolas. XI SEMEAGRI – Semana de Engenharia Agrícola da Unicamp. Agrológica - Empresa Jr. de Eng<sup>a</sup> Agrícola, Campinas, 122 p, 1999.

BROOKER, D. B., BAKKER-ARKEMA, F. W., HALL, C. W., 1992, “Drying and storage of grains and oilseeds”. Westport: The AVI Publishing Company.

Cano-Chauca, M. et al. Drying curves and water evaluation of dried banana. In: INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM, 14, 2004, São Paulo. Proceedings... São Paulo: IDS, 2004. p. 2013-2020.

CARVALHO, M. S. Produção de polpa de abóbora em pó pelo processo de secagem em leito de espuma. 2014. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.

CARVALHO FILHO, M. A. S. Preparação e estudo termoanalítico dos cinamatos de terras raras, exceto (escândio), no estado sólido. Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista. Araraquara, 2000.

CAVALCANTI MATA, M.E.R.M. Efeito da secagem em altas temperaturas por curtos períodos de tempo em camada estacionária, sobre a armazenagem de sementes de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) variedade “carioca”. 1997. (Tese de doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP.

CEREDA, M.P.; WOSIACKI, G.; CONCEIÇÃO, F. D. A. Características físico-químicas e reológicas de cultivares de batata doce. (*Ipomoea batatas*). *Ciênc. Tecnol. Aliment.* Campinas, v.5, p.61-70, 1985.

CEREDA, M., VILPOUX, O. F. Tecnologia, usos e potencialidades de tuberosas amiláceas latino americanas. São Paulo: Fundação Cargill, v.3, p. 711, 2003.

CEYLAN, I., AKTAS, M., DOGAN, H., 2007, "Mathematical modeling of drying characteristics of tropical fruits". Applied Thermal Engineering 27. 1931-1936. Elsevier, 2007.

CIP - Centro Internacional de La Papa. 2018, 6 de junho. Facts and figures about sweet potato. Disponível em: <http://www.cipotato.org>.

CORRÊA, J. L. G. ET AL. Desidratação osmótica de tomate seguida de secagem. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, v. 10, n. 1, p. 35-42, 2007.

CORRÊA, P. C.; ARAÚJO, E. F.; AFONSO JÚNIOR, P. C. Determinação dos parâmetros de secagem em camada delgada de sementes de milho doce (*Zea mays* L.). Revista Brasileira de Milho e Sorgo, Sete Lagoas, v. 2, n. 2, p. 110-119, 2003.

COSTA, L. M.; RESENDE, O.; SOUSA, K. A.; GONÇALVES, D. N. Coeficiente de difusão efetivo para a secagem de sementes de crambe (*Crambe abyssinica*). Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 15, n. 10, p. 1089-1096, 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662011001000014>.

CRANK, J. A. The mathematics of diffusion. 2 ed. Oxford: University Press. 1975, 414 p.

D.S.C. SOARES, J.T.S. SANTOS, L.A.L.C. LIMA, T.P. NUNES, A. C. S. D. CHAVES e A.M. de OLIVEIRA Jr. Avaliação dos modelos de processos de secagem da jabuticaba in natura com o uso de indicadores de desempenho. XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química. Fortaleza-CE, 25-29 de setembro, 2016.

DAUDIN, J.D. Calcul des cinétiques de séchage par l'air chaud des produits biologiques solides. Sciences des Aliments, Paris, v.3, n.1, p.1-36, 1983.

DECAREAU, R.V. & PETERSON, R.A. (1986). Microwave processing and engineering. Chichester: Ellis Horwood, 224 p.

DIÓGENES, A. de M. G., QUEIROZ, A. J. de M., FIGUEIRÊDO, R. M. F., SANTOS, D. da C. Cinética de secagem de grãos de abóbora. Revista Caatinga, Mossoró, v. 26, n. 1, p. 71-80, 2013.

DIONELLO, R. G., BERBERT, P. A., MOLINA, M. A. B. DE., PEREIRA, R. DE C., VIANA, A. P., CARLESSO, V. DE O., 2009, “Secagem de fatias de abacaxi in natura e pré-desidratadas por imersão-impregnação: cinética e avaliação de modelos”. Ciência e Tecnologia de Alimentos. Campinas-SP-Brasil. 29(1): 232-240, jan.-mar. ISSN 0101-2061.

DOYMAZ, I. Convective air drying characteristics of thin layer carrots. Journal of Food Engineering, Oxford, v. 61, n. 3, p. 359-364, 2004.

DOYMAZ, I. Thin layer drying characteristics of sweet potato slices and mathematical modelling. Heat Mass Transfer, v.47, n.3, p. 277-285, 2010.

DOYMAZ, I. Thin-layer drying behaviour of mint leaves. Journal of Food Engineering, Davis, v.74, n.3, p.370-375, 2006.

DOYMAZ, I., 2007, “Air-drying characteristics of tomatoes”. Journal of Food Engineering 78. ELSEVIER. 1291-1297.

EL-AOUAR, Â. A., BATISTA, M. B., JOHNATHAS DA COSTA SALVADOR, J. C., EÇA, K. S., 2007, “Estimação da difusividade efetiva na secagem de frutas com conteúdo de umidade inicial próximos”. II Jornada Nacional da Agroindústria. Bananeiras-PB-Brasil. 04 a 07 de dezembro.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2008, 20 de março. Cultura da batata-doce. Sistemas de produção, versão eletrônica. Disponível em: <<http://www.cnpq.embrapa.br/cultivares/batdoce.htm>>. Acesso em: 19 de agosto de 2018.

ENGELDER, D. & BUFFLER, C. 1991. Measuring dielectric properties of food products at microwave frequencies. Microwave World, v.12, 2, p.6-15.

FARIA, R.Q.; TEIXEIRA, I.R.; DEVILLA, I.A.; ASCHERI, D.P.; RESENDE, O. Cinética de secagem de sementes de crambe. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 16, n. 5, p. 573-583, 2012.

FERREIRA, M.M.P. Desenvolvimento, caracterização e secagem de sementes com cobertura artificial. Doutorado, PPG-EQ/UFSCAR, 2003, p. 235.

FENNEMA, O. R., 1995, “Química de los alimentos”. 4ª edição. Porto Alegre-RS-Brasil. Editora: Artmed.

FIGUEIRA, G.M.; PARK, K.J.; BROD, F.P.R.; HONÓRIO, S.L. Evaluation of desorption isotherms, drying rates and inulin concentration of chicory roots (*Cichorium intybus* L.) with and without enzymatic inactivation. *Journal of Food Engineering*. Oxford, v.63, n.3, p.273-80, 2004.

FORTES, M.; OKOS, M.R. Changes in physical properties of corn during drying. *Transaction of the ASAE*, St. Joseph, v.23, n.4, p.1004-1008, 1980

FRAILE, V., LESCANO, C. A. A., ROCHA, S. C. S., 2005, “Determinação das curvas de secagem do resíduo do leite de soja em leito de jorro com inertes e da curva fluidodinâmica para o material inerte”. UNICAMP-SP-BRASIL. VI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica.

FURTADO, G.; SILVA, F.; PORTO, F. S.; SANTOS, A. G. Secagem de polpa de ciriguela pelo método de camada de espuma. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, 12 (1) (2010), pp. 9-14.

GABAS, A. L. Secagem da Uva Itália em Leito Fixo. Universidade Estadual de Campinas (Dissertação de Mestrado) Campinas – SP, p.2-4, 1998.

GIRON, D. Applications of thermal analysis and coupled techniques in pharmaceutical industry. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 68, p. 335-357, 2002.



GONELI, A. L. D. et al. Cinética de secagem dos grãos de café descascados em camada delgada. *Revista Brasileira de Armazenamento*, Viçosa, n. 11, p. 74-80, 2009.

GONÇALVES, A. C. NO., MALUF, W. R., GOMES, L. A. A., & MACIEL, G. M. (2012). Correlation and estimate population parameters for sweet potato. *Horticultura Brasileira*, 30, 713-719.

GOUVEIA, J. P. G.; MOURA, R. S. F.; ALMEIDA, F. A. C.; OLIVEIRA, A. M. V.; SILVA, M. Avaliação da cinética de secagem de caju mediante um planejamento experimental. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. Campina Grande v. 6, n. 3, p. 471-474, 2002.

GOUVEIA, J.P.G. de Avaliação da cinética de secagem do gengibre (*Zingiberofficinale*, Roscoe). 1999. (Tese de doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

GOUVEIA, J.P.G. de et al. Determinação das curvas de secagem em frutos de cajá. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, v. Especial, n.1, p.65-68, 2003.

GOYAL, R. K.; KINGSLY, A. R. P.; MANIKATAN, M. R.; ILYAS, S. M. Thin-layer Drying Kinetics of Raw Mango Slices. *Biosystems Engineering*, v.95, p. 43-49, 2006.

GUEDES, M. C. Antocianinas: pigmento natural ou remédio? *Revista Científica do IMAPES*, v.2, p. 71-74. 2004.

GURGEL, C. E. M. R. Secagem da polpa de graviola (*annona muricata* l.) em camada de espuma - desempenho do processo e características do produto. 2014. 66 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

GURJÃO, K. C. O. Desenvolvimento, armazenamento e secagem de tamarindo (*Tamarindus indica* L.). 2006. 165 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2006.

HACIHAFIZOGLU, O.; CIHAN, A.; KAHVECI, K. Mathematical modelling of drying of thin layer rough rice. *Food and Bioproducts Processing*, v. 86, n. 4, p. 268-275, 2008.

HAWLADER, M. N. A., UDDIN, M. S., H. O., J.C., TENG. A. B. W., 1991. "Drying characteristics of tomatoes". *Journal of Food Engineering*, v. 14, p. 259-268.

HOFISKY, V. A. et al. Cinética de secagem do resíduo de abacaxi enriquecido. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.17, n.6, p.640–646, 2013.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produção nacional de batata.

Disponível em:

<<[http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia\\_visualiza.php?id\\_noticia=740](http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=740)>>

INCROPERA, F. P., DEWITT, D. P., 2006, "Fundamentos de transferência de calor e de massa". 5ª edição. Rio de Janeiro-RJ-Brasil. Acessado em 15 de outubro de 2016.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ, 1985, "Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz". v. 1: Métodos químicos e físicos para análise de alimentos, 3. Ed. São Paulo: IMESP, p. 21-22.

IONASHIRO, M. Fundamentos da Termogravimetria. Análise Térmica Diferencial. Calorimetria Exploratória Diferencial. São Paulo: Giz, 2005.

KARATHANOS, V. T. Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. *Journal of Food Engineering*, v. 39, n. 4, p. 337-344, 1999.

KARIM, M. A., HAWLADER, M. N. A., 2005, "Mathematical modelling and experimental investigation of tropical fruits drying". *International Journal of Heat and Mass Transfer* (48). 4914-4925.

KEEY, R. B. Tópicos em transferência de calor e massa. Avanços em cinética de secagem, 1997.

KEEY, R.B. Drying: principles and practice. Oxford, 1972.

KILPATRICK, P. W.; LOWER, E.; VAN ARSDEL, W. B. Tunnel dehydrators for fruits and vegetables. *Advances in Food Research*, v.6, p.360-375, 1955.

KOTOVICZ, V., 2011, “Otimização da desidratação osmótica e secagem do yacon (*polymnia sonchifolia*)”. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba-PA-Brasil.

LAGUERRE, J. C.; TAUZIN, V. & GRENIER, E. Hot Air and Microwave Drying of Onions: A comparative Study. In *Drying'98*, vol. B, 1280-1287, 1998.

LAHSASNI, S., KOUHILA, M., MAHROUZ, M., & FLIYOU, M. (2003). Moisture adsorption-desorption isotherms of prickly pear cladode (*Opuntia ficus indica*) at different temperatures. *Energy Conversion and Management*, 44 (6), 923–936

LEITE, A. L. M. P.; SILVA, F. S.; PORTO, A. G.; PIASSON, D.; SANTOS, F. “contração volumétrica e cinética de secagem de fatias de banana variedade da terra. *Pesq. Agropec. Trop.*, Goiânia, v. 45, n. 2, p. 155-162, abr./jun. 2015.

LEWIS, W. K. The rate of drying of solids materials. In the Symposium on Drying. *The Journal of I. & Engineering Chemical*, v.13, n.5, p.4277-432, 1921.

LOPES, F. J. Estudo do fenômeno de encolhimento na secagem convectiva de abacaxi com aplicação de microondas. 2013. 143 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2013.

LOPES, F. J.; et al. Ajuste de modelos semiteóricos para predição de cinética de secagem de yacon (*Smallanthus sonchifolius*). In: Congresso brasileiro de sistemas particulados, São Carlos, 2015.

MACHADO, A. M., SOUZA, M. C., JUNQUEIRA, M. S., SARAIVA, S. H., TEIXEIRA, L. J. Q., 2012. “Cinéticas de secagem do abacaxi cv. Pérola”. *Enciclopédia Biosfera*, Centro Científico Conhecer, Goiânia, v.8, n.15, p.428.

MACHADO, V. M., 2009, “Estudo da secagem do pendúculo do caju em sistemas convencionais e solar: modelagem e simulação do processo”. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal-RN-Brasil. Tese de Doutorado.

MADAMBA, P. S.; DRISCOOL, R. H.; BUCKLE, K. A. Thinlayer drying characteristics of garlie slices. Journal of Food Engineering, Davis, V.29, n.1, p. 75-97, 1996.

MANONMANI, A., THYAGARAJAN, T., SHUTA, S. evolutionary algorithm-based multi-objective control scheme for food drying process, 2016.

MARCINKOWSKI, E. DE A., 2006, “Estudo da cinética de secagem, curvas de sorção e predição de propriedades termodinâmicas da proteína texturizada de soja”. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre-RS-Brasil. Dissertação de Mestrado.

MARQUES, L. F. Processamento do pedúnculo do caju em avançado estágio de maturação pela desidratação osmótica e secagem para elaboração de passas de caju. 2006.105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

MARTINAZZO, A. P.; CÔRREA, P. C.; RESENDE, O.; MELO, E. E. Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Campina Grande-PB, v.11, n.3, p.301–306, 2007.

MARTINS, G. M. V., FERREIRA, J. P. L., SANTOS, A. E., NOBRE, R. S. cinética de secagem em camada fina da polpa cladódios de palma de palma forrageira (*Opuntia fícus indica Mill*) em estufa com circulação forçada de ar. XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Florianópolis/SC, 19-22 de outubro, 2014.

MAYOR, L.; SERENO, A. M. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. Journal of Food Engineering, v.61, p.373–386, 2004.

MAZZA, G. E LE MAGUER, M. Water sorption proper-ties of yellow globe onion (*Allium cepa L.*). Canadian Institute Science Technology Journal, v.11, n.4., p.189-193, 1978.

MAZZA, G.; LE MANGUER, N. Dehydration of onion: some theoretical and practical considerations. *Journal of Food Technology*. v.15, p.181-194, 1980.

MCMINN, W. A. M.; MAGEE, T. R. A. Physical characteristics of dehydrated potatoes: part I. *Journal of Food Engineering*, Oxford, v. 33, n. 1-2, p. 37-48, 1997.

MEDEIROS, F. K. - Obtenção de zeólitas sintéticas a partir de cinza volante ativada alcalinamente, tratada organicamente para uso como agente de adsorção de óleo e viscosificante. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal da Paraíba – UFPB, João Pessoa, 2015.

MELONI, P. L. S. Produção de frutas desidratadas e cristalizadas. Instituto Frutal, 2009.

MELO, P. C.; DEVILLA, E. A.; CAETANO, J. M.; REIS, V. B. S. X.; ANTUNES, A. M.; SANTOS, M. M. Modelagem matemática das curvas de secagem de grãos de feijão carioca. *Agrária - Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, Recife-PE, UFRPE, v.11, n.3, p.247-252, 2016.

MENEZES, M.L.; STRÖHER, A.P.; PEREIRA, N.C.; BARROS, S.T.D. Análise da cinética e ajustes de modelos matemáticos aos dados de secagem do bagaço do maracujá-amarelo. *ENGEVISTA*, v.15, n.2, p.176-186, 2013.

MENGES, H. O.; ERTEKIN, C. Mathematical modeling of thin layer drying of Golden apples. *Journal of Food Engineering*, Oxford, v. 77, n. 1, p. 119-125, 2006.

MENON, A.S.; MUJUMDAR, A.S. Drying of solids: principles, classification and selection of dryers. In: MUJUMDAR, A.S. *Handbook of Industrial Drying*. New York: Marcel Dekker Inc., cap. 9, p. 295-326, 1987.

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A new model for single-layer drying. *Drying Technology*, v. 20, n. 7, p. 1503-1513, 2002.

MIRANDA, J. E. C.; FRANÇA, F.H.; CARRIJO, O.A.; SOUZA, A.F.; PEREIRA, W.; LOPES, C.A.; SILVA, J.B.C *A Cultura da batata-doce*. Brasília: Embrapa-CNPQ, 1995.

MIRANDA, J.E.C.; FRANÇA, F.H.; CARRIJO, O.A.; SOUZA, A.F. Batata-doce (*Ipomoea batatas* (L.) Lam). Embrapa CNhp Circular Técnica nº 3, Brasília, DF, v.3, p.1-13, 1987.

MONZÓ-CABRERA, J.; DÍAZ-MORCILLO, A.; CATALÁ-CIVEIRA, J. M. & DE LOS REYES, E. Heat and Mass Transfer Characterisation of Microwave Drying of Leather. In Drying'00, 27, 2000.

MURR, F. E. X. Estudo comparativo dos fenômenos de secagem de batata (*Solanum tuberosum*, L. *Cultivar Bintje*). Campinas: Departamento de Engenharia de Alimentos da Faculdade de Engenharia de Alimentos. 1992. 188p. (Tese de Doutorado).

NICOLETI, J. F., 2005, "Secagem de Caqui em Condições Controladas: Efeito sobre a Qualidade do Produto e Consumo Energético". FEA/UNICAMP, Campinas – SP-Brasil. Tese de Doutorado.

NINDO, C. I; TANG, J.; POWERS, J. R.; BOLLAND, K. Energy consumption during Refractance Window evaporation of selected berry juices. International journal of energy research., v.28, p. 1089-1100, 2004.

NINDO, C. I.; TANG, J. Refractance Window Dehydration Technology: A novel Contact Drying Method. Drying Technology, v. 25, p. 37-48, 2007.

NINDO, C. I. Novel Drying Method for Vegetables, Fruits, Herbs, and Aquatic Resources. Anais. Annual Conference Vancouver, British Columbia July, p. 13-16, 2008.

NODA, T.; TAKAAHATA, Y.; NAGATA, T. Properties of sweet potato starches from diferente tissue zones. Starch/Starke, v.44,n.10,p.365-368,1992.

OCHOA, M. R. et. al. Analysis of shrinkage phenomenon of whole sweet cherry fruits (*Prunus avium*) during convective dehydration with very simple models. Journal of Food Engineering, Oxford, v. 79, n. 2, p. 657-661, 2007.

OLIVEIRA, D. M.; REIS, K. C.; PEREIRA, J. Produção de farinha de batata utilizando secagem ao sol. Revista Brasileira de Armazenamento. Viçosa, v. 31, n. 2, p. 125-135, 2006.

OLIVEIRA, R.A.; OLIVEIRA, W. P.; PARK, K. J. Determinação da difusividade efetiva de raiz de chicória. Engenharia Agrícola. Unesp, Jaboticabal-SP. v.26, n.1, p.181-189, 2006.

PAGE, G. E. Factors influencing the maximum of air drying shelled corn in thin layer. 1949. Dissertation (Master's Thesis) - Department of Mechanical Engineering, Purdue University, Purdue.

PALACIN, J. J. F.; LACERDA FILHO, A. F.; CECON, P. R.; MONTES, E. J. M. Determinações das curvas de secagem de milho nas espigas (*Zea mays L.*). Engenharia na Agricultura, Viçosa, v. 13, n. 4, p.300-313, 2005.

PARK, K. J., ANTONIO, G. C., 2006, "Análises de materiais biológicos". Campinas-SP-Brasil. pp. 4-7.

PARK, K.J. Estudo comparativo do coeficiente de difusão sem e com encolhimento durante secagem. Campinas, 1987, 54p. Dissertação (Mestre em Engenharia de Alimentos). Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas.

PARK, K.J.; BIN, A.; BROD, F.P.R. Drying of pear 'd'Anjou' with and without osmotic dehydration. Journal of Food Engineering, v.56, p.97-103, 2002.

PARK, K.J.; YADO, M.K.M.; BROD, F.P.R. Estudo de secagem de pêra bartlett (*Pyrus sp.*) em fatias. Ciência e Tecnologia de Alimentos, Campinas, v. 21, n. 3, p. 288-292, 2001b.

PARKIN, K.L.; SCHWOBE, M.A. Effects of lowtemperature and modified atmosphere on sugar accumulation and chip color in potatoes (*Solanum tuberosum*). Journal of Food Science, Chicago, v. 55, n. 5, p.1341-1344, 1990.

PEREIRA, N. R. Estudo da aplicação de micro-ondas na secagem de bananas tratadas osmoticamente. 2007. 188 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

PINTO, L.A.A.; TOBINAGA, S. Modelos de secagem em camada fina de alimentos.

PRADO, M.E.T. Secagem de tâmaras (*Phoenix dactylifera* L.) para a obtenção de tâmara passa. 1998. 149f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos). UNICAMP/FEA Campinas. 1998.

PRADO, M.M. Secagem de sementes de mamão papaya. Mestrado, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos-SP, 1999, p. 108.

QUEIROZ, M. R; NEBRA, S. A. Theoretical and experimental analysis of the drying kinetics of bananas. *Journal of Food Engineering*, Oxford, v. 4, n. 2, p. 127- 132, 2001.

QUEIROZ, M.R. Estudo teórico-experimental da cinética de secagem de bananas. Campinas, 1994, 119f. Dissertação (Mestrado Faculdade de Engenharia Mecânica). Universidade Estadual de Campinas.

RAMASWAMY, H.S.; MARCOTTE, M. *Food Processing: Principles and Applications*; CRC Press: Boca Raton, FL, 2006.

RATTI, C. Shrinkage during drying of foodstuffs. *Journal of Food Engineering*, Oxford, v. 23, n. 1, p. 91-105, 1994.

RATTI, C. Hot air and freeze-drying-value foods: a review. *Journal of Food Engineering*, v. 49, n. 4, p. 311-319, 2001.

REIS, R. C.; BARBOSA, L. S.; LIMA, M. L.; REIS, J. S.; DEVILLA, I. A.; ASCHERI, D. P. R. Modelagem matemática da secagem da pimenta cumari do Pará. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, n. 4, p. 347–353, 2011.

RIBEIRO, E. P., SERAVALLI, E. A. G., 2004, “Química de Alimentos”. Editora: Edgard Blucher: Instituto Mauá de Tecnologia – SP.



ROMERO-PENÑA, L. M.; KIECKBUSCH, T. G. Influência de condições de secagem na qualidade de fatias de tomate. *Brazilian Journal. Food Technology*. Campinas, v. 6, n. 1, p. 69-76, 2003.

ROVEDO, C. O.; SUAREZ, C.; VIOLLAZ, P. E. Kinetics of forced convective air drying of potato and squash slabs. *Food Science and Technology International*, Buenos Aires, v. 3, n. 4, p. 251-261, 1997.

SACILIK, K.; KONURALP, A. E. The thin layer drying characteristics of organic apple slices. *Journal of Food Engineering*, Oxford, v. 73, n. 3, p. 281-289, 2006.

SANTOS, C. T., BONOMO, R. F., CHAVES, M. A, FONTAN, R. C. I., BONOMO, P., 2010. “Cinética e modelagem da secagem de carambola (*Averchoa Carambola L.*) em secador de bandeja”. *Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Itapetinga, Brasil*, v.32, n.3, p. 309-313.

SARAVACOS, G.; DOUZAS, A.; MAROUSIS, S.; KOSTAROUPOLUS, A. Effective thermal and moisture diffusivities of granular starchs, In: *DRYING 89*. New York; Ed. Arum S. Mujundar and Michel A. Roques, Hemisphere Publishing Company, 314-319, 1989.

SHERWOOD, T. K. Application of the theoretical diffusion equations to the drying of solids. *Transation Am. Inst. Chemical Engineering*, v.27, p.310-33, 1931.

SILVA, J. B. C.; LOPES, C. A.; MAGALHÃES, J. S. Cultura da batata-doce. In: CEREDA, M. P.; *Agricultura: Tuberosas amiláceas Latino Americanas*, São Paulo: Cargill, v.2, p. 449-503, 2002.

SILVA, R. B.; SILVA, S. F.; PORTO, A. G.; ALVES, A. P. Estudo da cinética de secagem de polpa de carambola. *R. bras. Tecnol. Agroindustr.*, Ponta Grossa, v. 10, n. 2, p. 2069-2080, jul./dez. 2016.

SILVEIRA, A. M & RAGHAVAN, G. S. V. Temporal Variation of Surface and Internal Temperatures During Microwave Drying of Strawberries. In: *XXVII Congresso Brasileiro de*

Sistemas Particulados, 1999, Campos do Jordão – SP. Anais do XXVII ENEMP, p. 593-598, 1999.

SOUSA, A. F.; ANDRADE, E. T.; FIGUEIRA, V. G.; MORAES, E. D'A.; FILHO, L. C. C. Estudo da cinética de secagem, contração volumétrica e análise da difusão líquida do morango (*fragaria sp.*). *Engevista*, v. 16, n. 1, p.8-18 março 2014.

SOUSA, F. C.; SOUSA, E. P.; SILVA, L. M. M.; MARTINS, J. J. A.; GOMES, J. P.; ROCHA, P. T. Modelagem matemática para descrição da cinética de secagem de polpa de oiti. *Revista Educação Agrícola Superior*, v. 26, n.2, p. 108-112, 2011.

SOUSA, M.B.; Pedroza, J.P.; Beltrão, N.E. de M.; Severino, L.S.; Dantas, F.P. Cinética de secagem do farelo de mamona. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, v.8, n.2, p.135- 146, 2006.

SOUZA, A. J.L.; PRAÇA, E. F.; GRANJEIRO, L.C.; BRAGA A. P. Composição centesimal de raízes de cultivares de batata-doce colhidas aos quatro meses. Mossoró. ESAM. 2005.

SOUZA, C, M, A. Simulação do processo de secagem de sementes de milho em camada fixa. *Revista Scientia Agricola*. v.59, n. 4, p.653 – 660, outubro de 2002.

SUNJKA, P.S.; RENNIE, T.J.; BEAUDRY, C.; RAGHAVAN, G.S.V. Microwave–convective and microwave–vacuum drying of cranberries: Acomparative study. *Drying Technology* 2004, 22(5), 1217–1231.

TACO. Tabela de composição nutricional. Disponível em: <<<http://www.unicamp.br/nepa/taco/tabela.php?ativo=tabela>>>. Acessado em: 19 de setembro de 2018.

TEBCHERANI, S.M.; NOGUEIRA, A.; WOSIACKI, G.; VIEIRA, R.G.; CAVA, S.S.; SEQUINEL, T. Itajara Minérios Ltda. Sistema de secagem de bagaço de maçã. PI0806012-6, 19 jun. 2008, 14 set. 2010.

THOMPSON, T. L.; PEART, R. M.; FOSTER, G. H. Mathematical simulation of corn drying: A new model. Transactions of ASAE, St. Joseph, v.11, n.4, p.582-586, 1968.

TORREGGIANI, D.; BERTOLO, G. Osmotic pre-treatments in fruit processing: chemical, physical and structural effects. Journal of Food Engineering, Oxford, v. 49, n. 2, p. 247-253, 2001.

TREYBAL, R.E. Drying: In: Mass Transfer Operations. New York, McGraw-Hill, p.569-575, 1963.

TUDOR, A. Sweet potato power: Discover your personal equation for optimal health. Victory Belt Publishing, 2012, 240p uma revisão da literatura. Vetor, Rio Grande, n.6, p.33-49, 2012.

VACCAREZZA, L.M.; LOMBARDI, J.L.; CHIRIFE, J. Kinetics of moisture movement during air drying of sugar beet root. Journal of Food Technology, n.9, p.317-327, 1974.

VAGENAS, G.K.; MARINOS-KOURIS, D.; SARAVACOS, G.D. An analysis of mass transfer in air-drying of foods. Drying Technology, v.8, n.2, p.323-342, 1990.

VAN ARSDEL, W.B. Drying phenomena. In: VAN ARSDEL, W.B.; COPLEY, M.J.; MORGAN Jr, A. I. Food Dehydration. 2a. ed., Westport, AVI Publishing Co., v.1, cap.3, p.22-57, 1973.

VENTURINI, T.; BENCHIMOL, D.A.; BERTUOL, M.B.; ROSA, M.B.; MEILI, L. Estudo da secagem e extração de sementes de mamão (*Carica Papaya* L.). Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental. REGET/UFSM, Santa Maria-RS. v.5, n 5, p.950-959, 2012.

VILELA, C. A. A.; ARTUR, P. O. Secagem do açafrão (*Curcuma longa* L.) em diferentes cortes geométricos. Ciência e Tecnologia de Alimentos, v.28, p. 387-394, 2008.

WAUGHON, T. G. M., PENA, R. DA S., 2008, “Modelagem da secagem em camada delgada da fibra residual do abacaxi”. B. CEPPA, Curitiba-PR-Brasil. V. 26, n. 2, p. 297-306. Jul./dez.

WOJEICCHOWSKI, A. P.; SOUSA, J. S.; MACIEL, L. G. E PARIONA, M. M. Perda de umidade da banana durante o processo de secagem. Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, PR, Brasil, 2015.

WOOLFE, J.A. Sweet potato: na untapped food resource. Cambridge: Cambdrige University Press, 1992. 643 p.

WRAY, D., RAMASWAMY, H. S. Novel Concepts in Microwave Drying of Foods, 2015.

WYNN, E.; KRIEG, M.A.; LANHAM-NEW, S.A.; BURCKHARDT, P. Postgraduate Symposium Positive influence of nutritional alkalinity on bone health. Proc Nutr Soc. 2010; 69(1):166-73.

ZOTARELLI, M. F. Produção e caracterização de manga desidratada em pó por diferentes processos de secagem. 165p. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

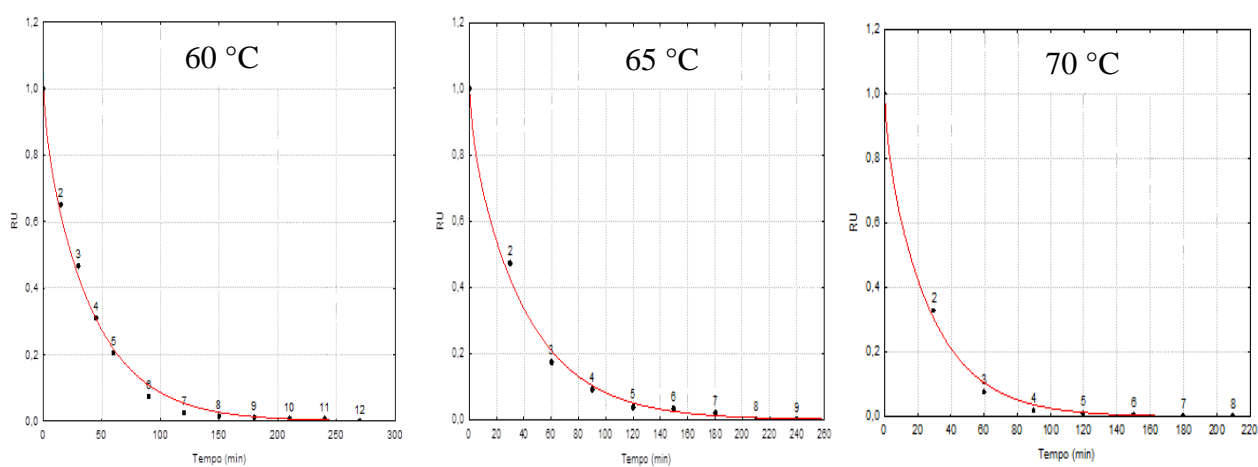
ZOUGZAS, N. P.; MAROULIS, Z. B.; MARINOS-KOURIS, D. Moisture diffusivity data compilation in foods tuffs. Drying Technnnology, v.14, p. 2225-2253, 1996.

## APÊNDICE I – CINÉTICA DE SECAGEM

### • MODELO DE FICK

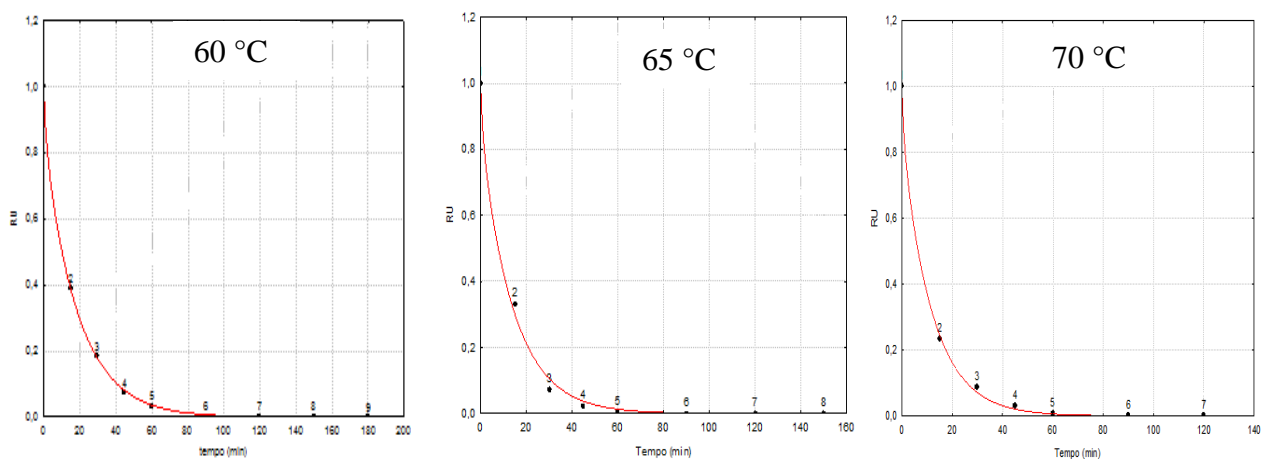
#### ➤ Secagem por estufa de convecção

Figura 5 - Razão de umidade em função do tempo para secagem da batata doce em estufa de convecção empregando o modelo matemático de Fick nas temperaturas de 60, 65 e 70 °C.



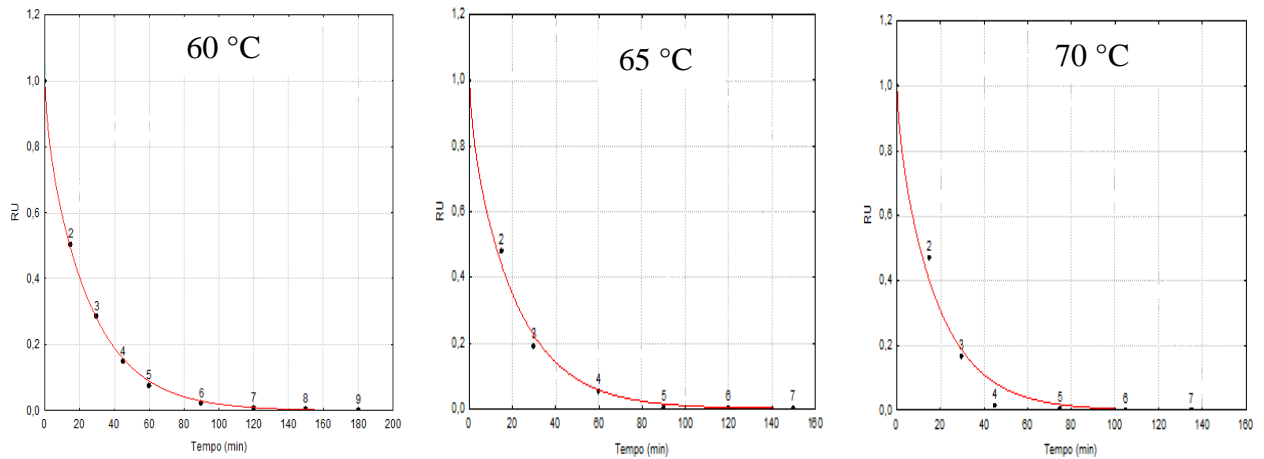
#### ➤ Estufa de circulação

Figura 6 - Razão de umidade em função do tempo para secagem da batata doce em estufa de circulação empregando o modelo matemático de Page nas temperaturas de 60, 65 e 70 °C.



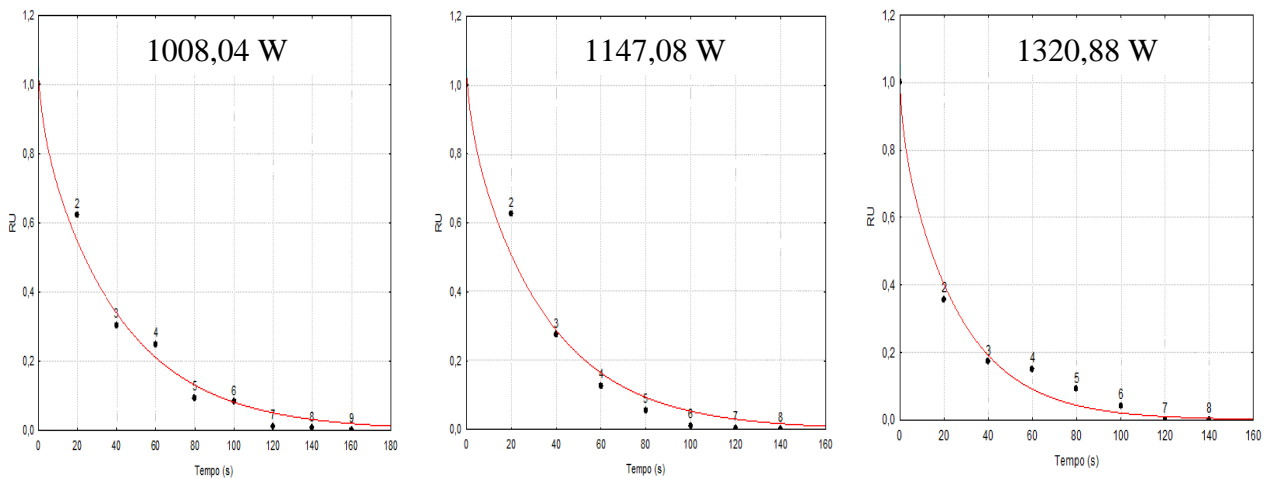
➤ Refractance window

Figura 7 - Razão de umidade em função do tempo para secagem da batata doce em refractance window empregando o modelo matemático de Fick nas temperaturas de 60, 65 e 70 °C.



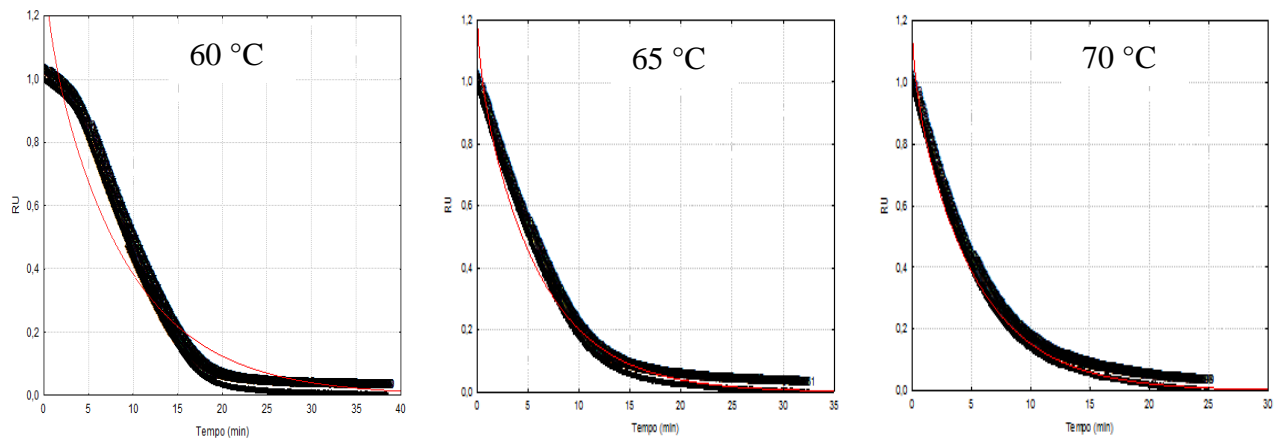
➤ Micro-ondas

Figura 8 - Razão de umidade em função do tempo para secagem da batata doce em micro-ondas empregando o modelo matemático de Fick nas potências de 1008,04 W, 1147,08 W e 1320,88 W.



➤ Termogravimetria (TG)

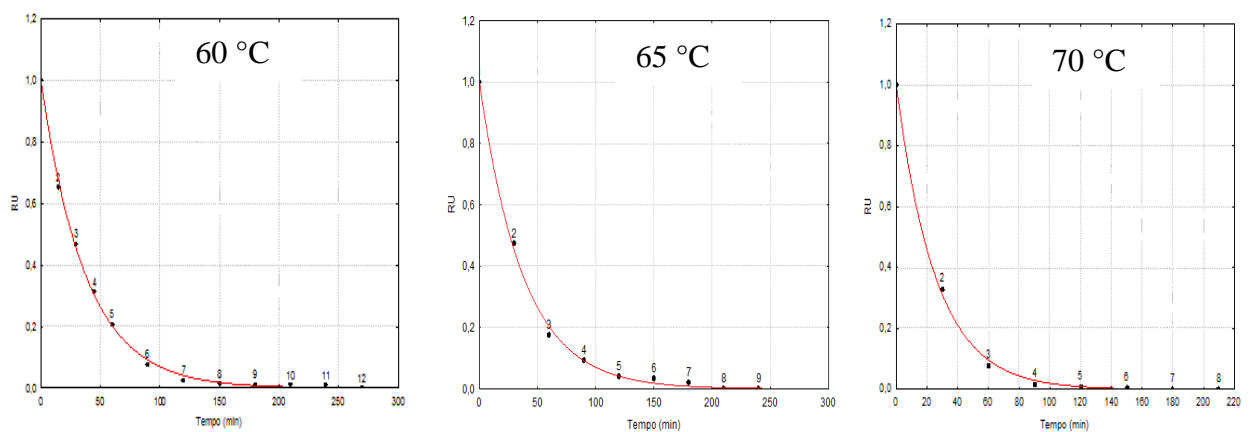
Figura 9- Razão de umidade em função do tempo para secagem da batata doce em TG empregando o modelo matemático de Fick nas temperaturas de 60, 65 e 70 °C.



- MODELO DE PAGE

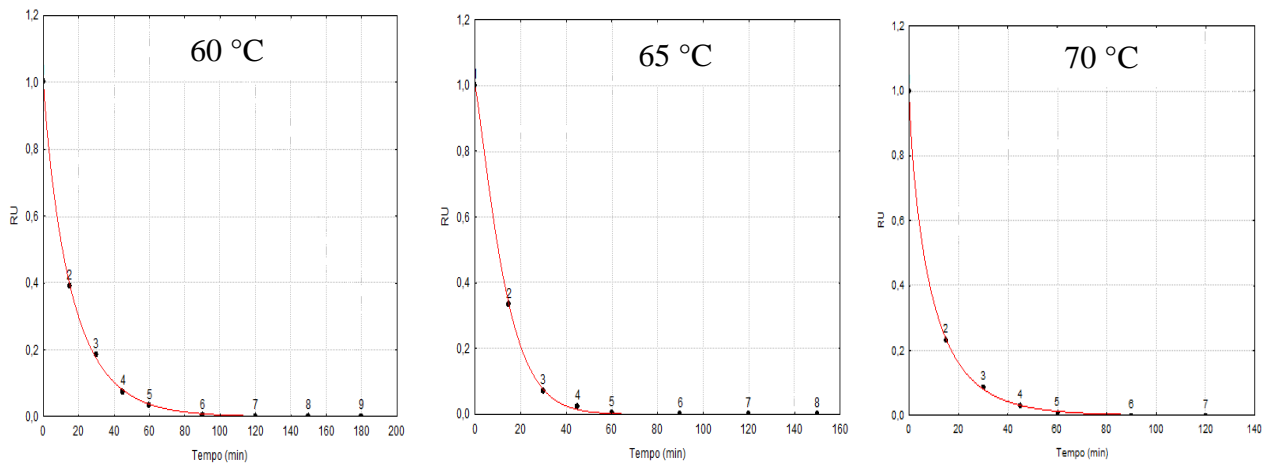
➤ Estufa de convecção

Figura 10- Razão de umidade em função do tempo para secagem da batata doce em estufa de convecção empregando o modelo matemático de Page nas temperaturas de 60, 65 e 70 °C.



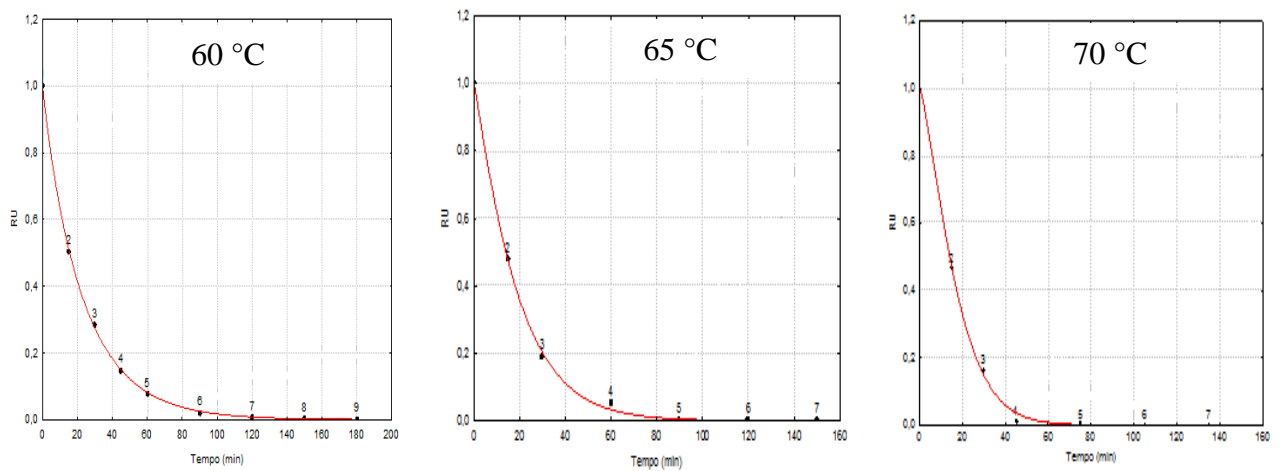
➤ Estufa de circulação

Figura 11 - Razão de umidade em função do tempo para secagem da batata doce em estufa de circulação empregando o modelo matemático de Page nas temperaturas de 60, 65 e 70 °C.



➤ Refractance window

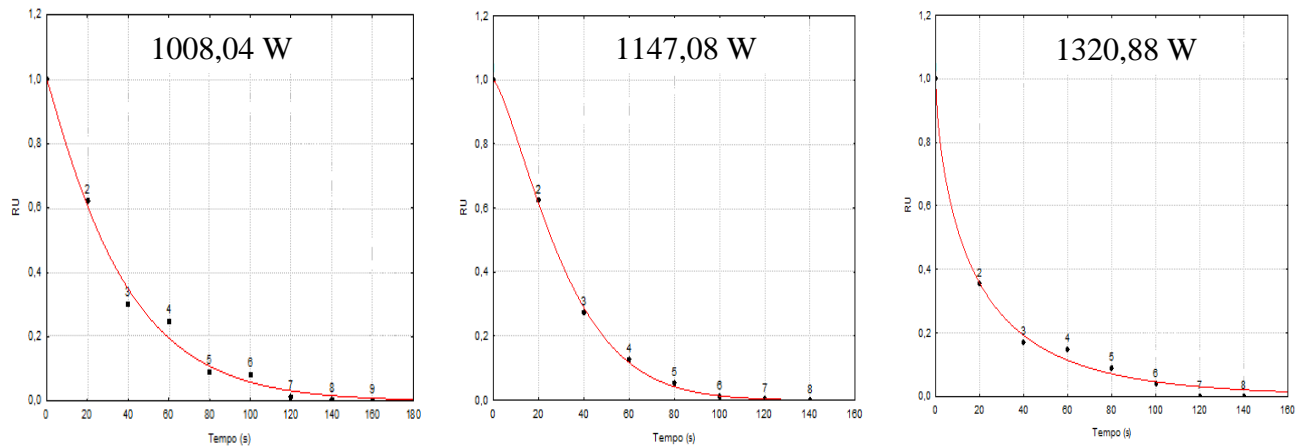
Figura 12 - Razão de umidade em função do tempo para secagem da batata doce em refractance window empregando o modelo matemático de Page nas temperaturas de 60, 65 e 70 °C.





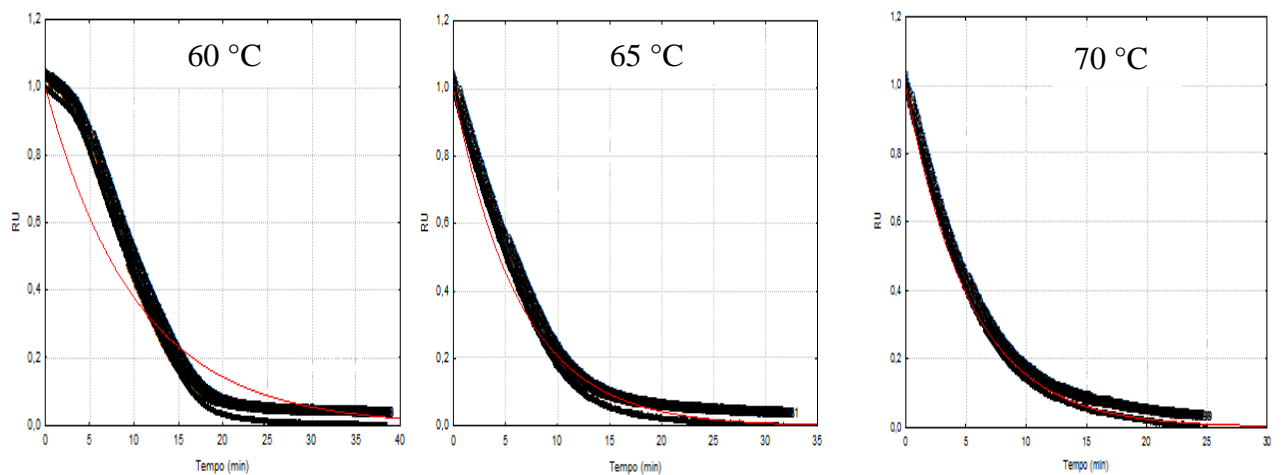
➤ Micro-ondas

Figura 13- Razão de umidade em função do tempo para secagem da batata doce em micro-ondas empregando o modelo matemático de Page nas potências de 1008,04, 1147,08 e 1320,88 W.



➤ Termogravimetria (TG)

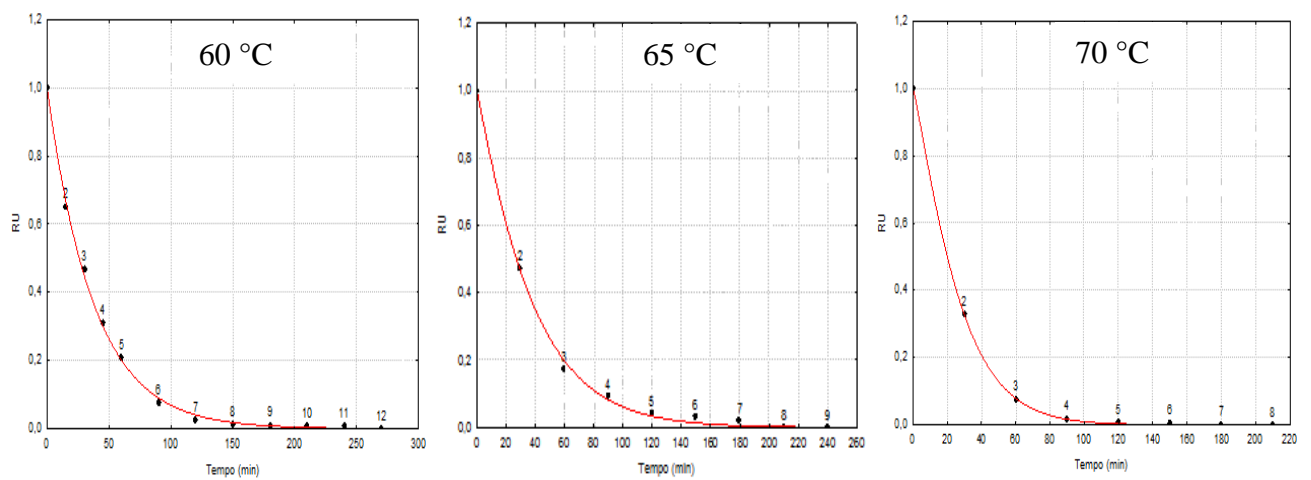
Figura 14- Razão de umidade em função do tempo para secagem da batata doce em TG empregando o modelo matemático de Page para secagem nas temperaturas de 60, 65 e 70 °C.



- MODELO DE THOMPSON

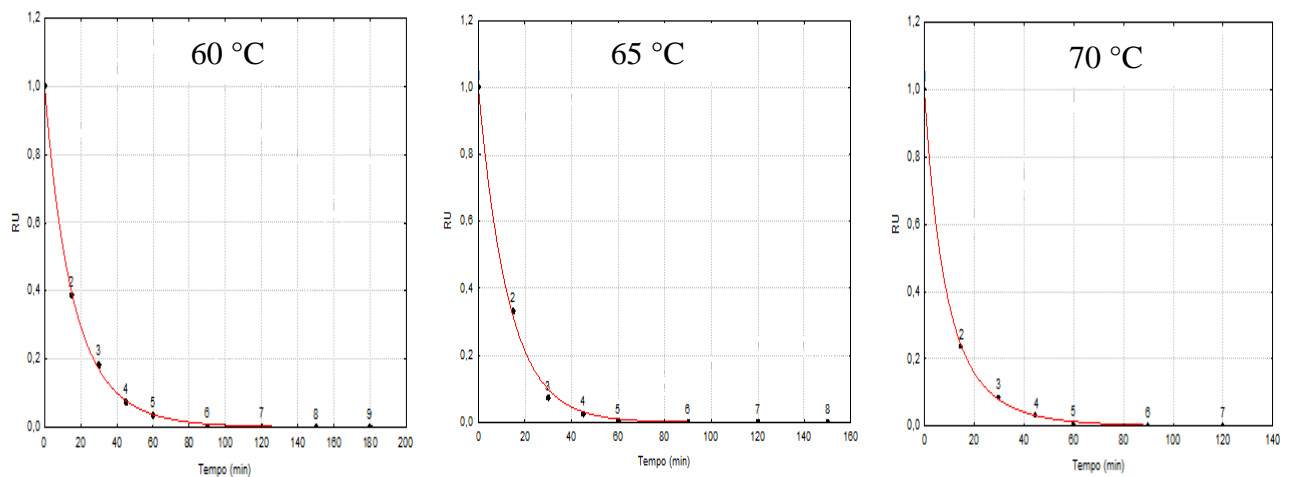
- Estufa de convecção

Figura 15 - Razão de umidade em função do tempo para secagem da batata doce em estufa de convecção empregando o modelo matemático de Thompson nas temperaturas de 60, 65 e 70 °C.



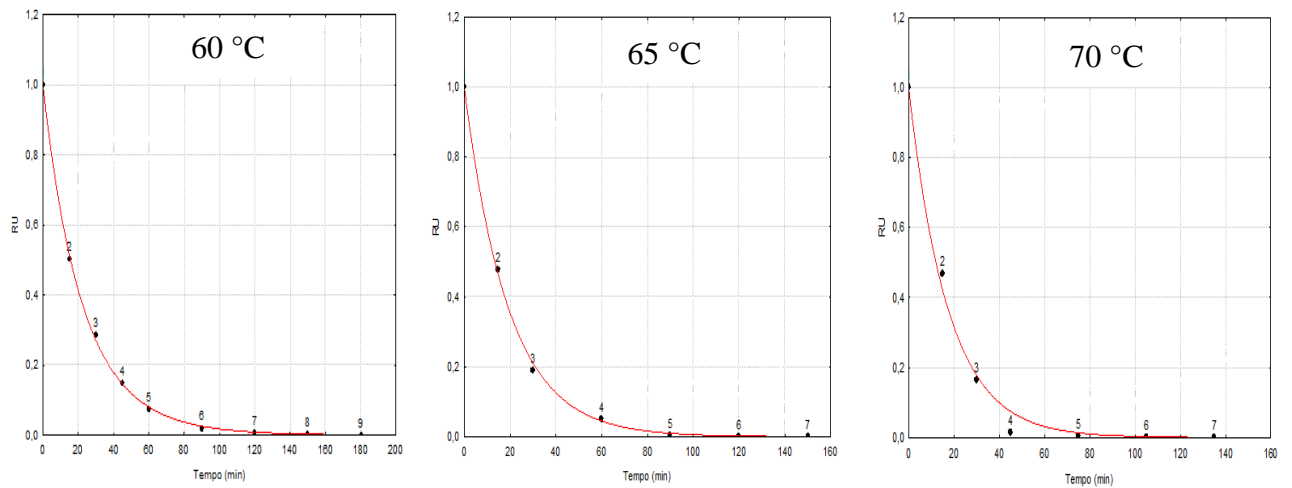
- Estufa de circulação

Figura 16 - Razão de umidade em função do tempo para secagem da batata doce em estufa de circulação empregando o modelo matemático de Thompson nas temperaturas de 60, 65 e 70 °C.



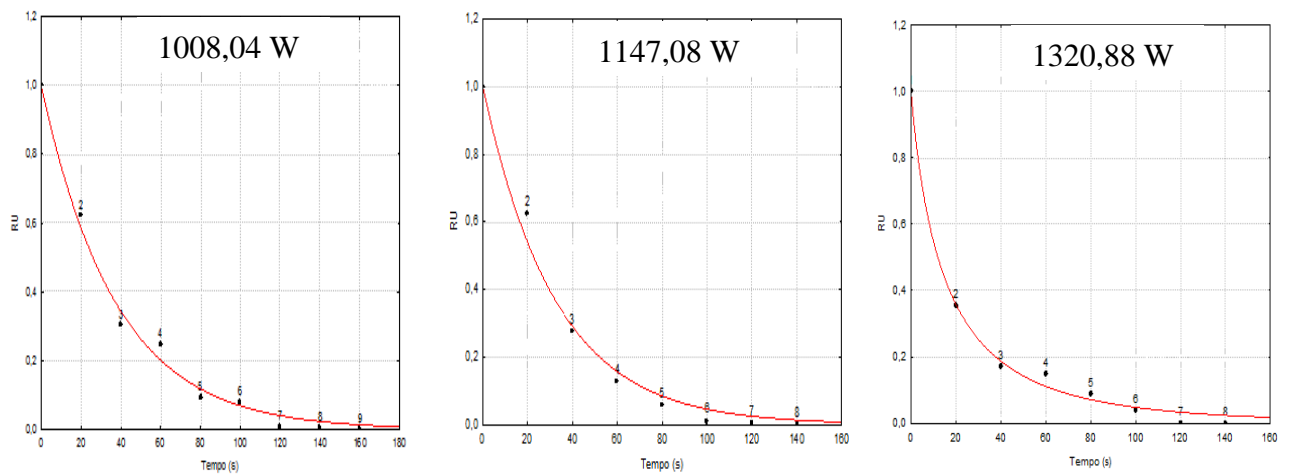
➤ Refractance window

Figura 17 - Razão de umidade em função do tempo para secagem da batata doce em refractance window empregando o modelo matemático de Thompson nas temperaturas de 60, 65 e 70 °C.



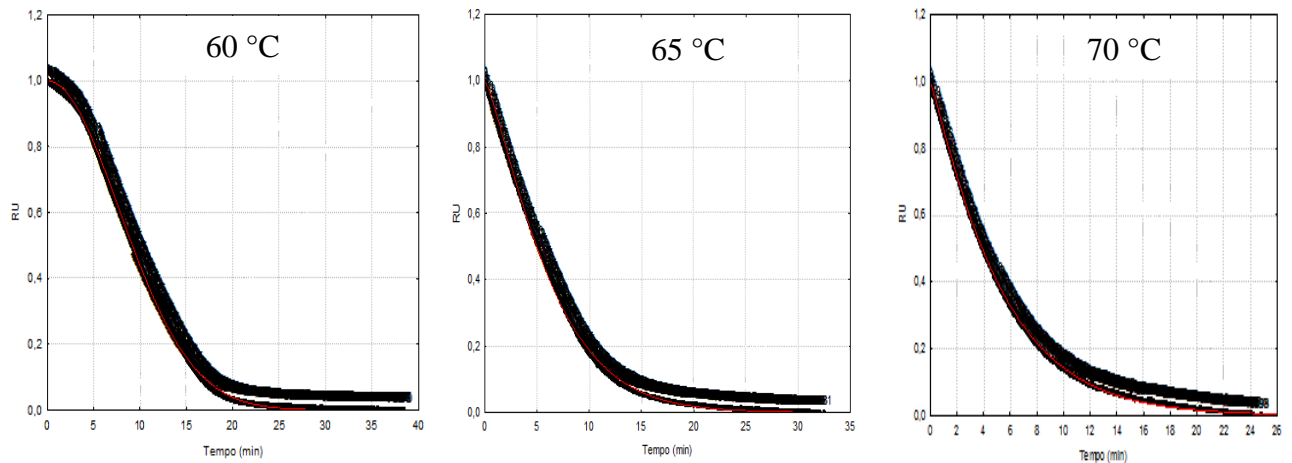
➤ Micro-ondas

Figura 18 - Razão de umidade em função do tempo para secagem da batata doce em micro-ondas empregando o modelo matemático de Thompson nas potências de 1008, 04, 1147,08 e 1320, 88 W.



➤ Termogravimetria (TG)

Figura 19- Razão de umidade em função do tempo da secagem da batata doce em TG empregando o modelo matemático de Thompson nas temperaturas de 60, 65 e 70 °C.

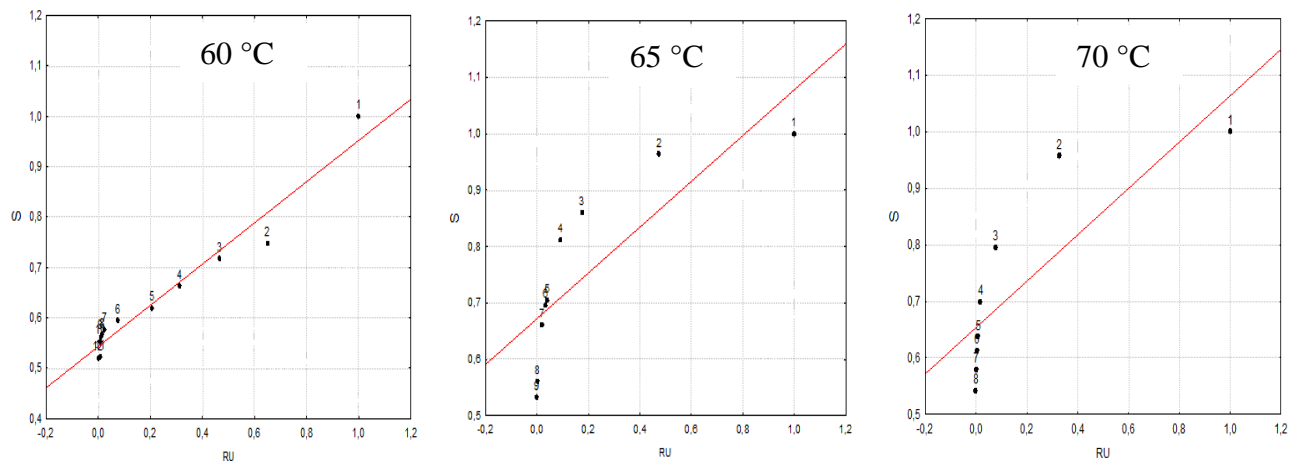


## APÊNDICE II - ENCOLHIMENTOS

- MODELO DE LOZANO

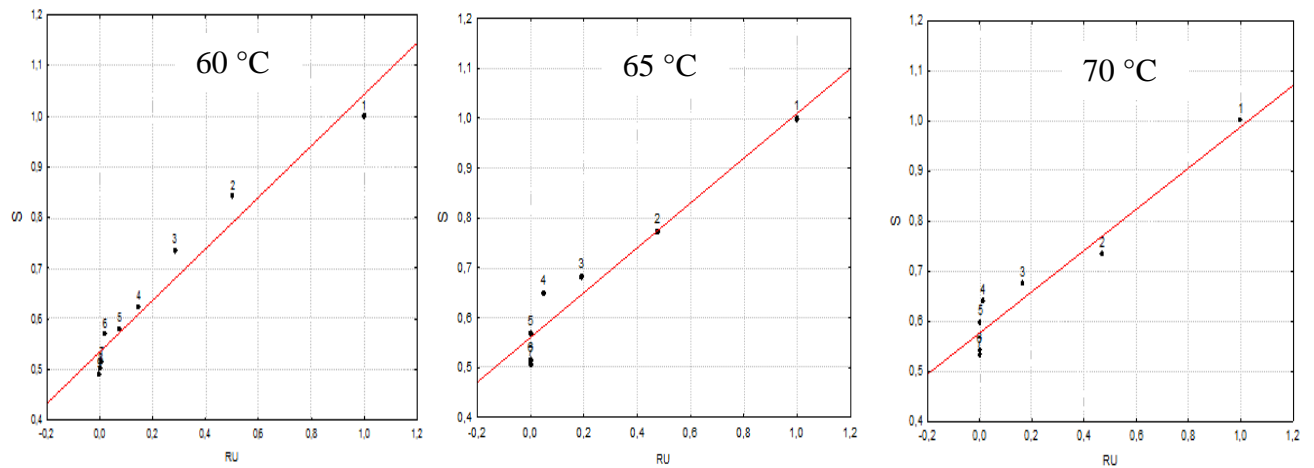
➤ Estufa de convecção

Figura 20- Encolhimento em função da razão de umidade (RU) para a batata doce aplicando o modelo de Lozano em estufa de convecção nas temperaturas de 60, 65 e 70 °C.



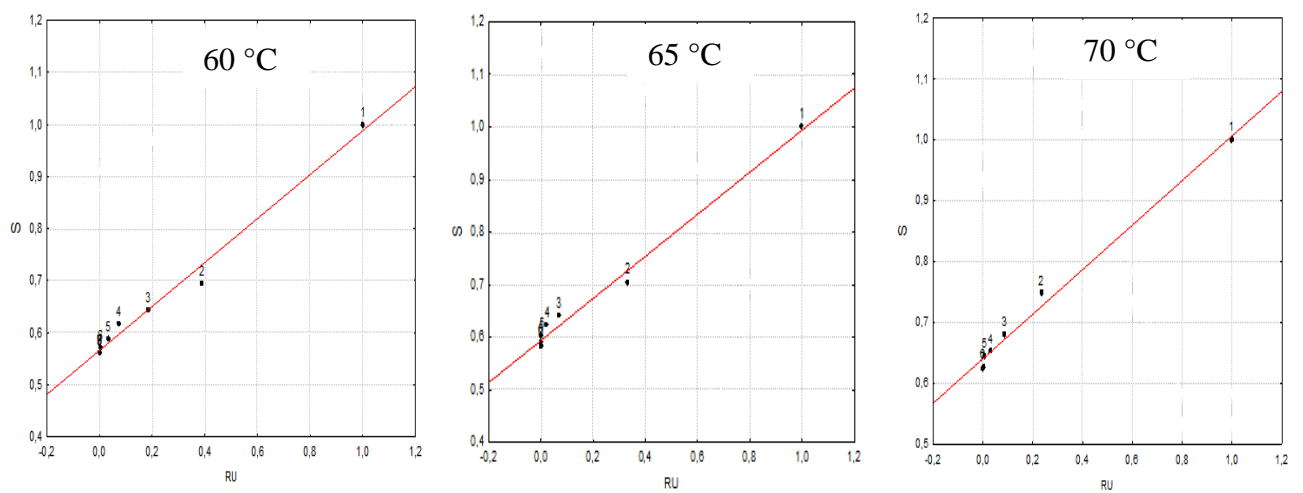
➤ Estufa de circulação

Figura 21- Encolhimento em função da razão de umidade (RU) para a batata doce aplicando o modelo de Lozano em estufa de circulação nas temperaturas de 60, 65 e 70 °C.



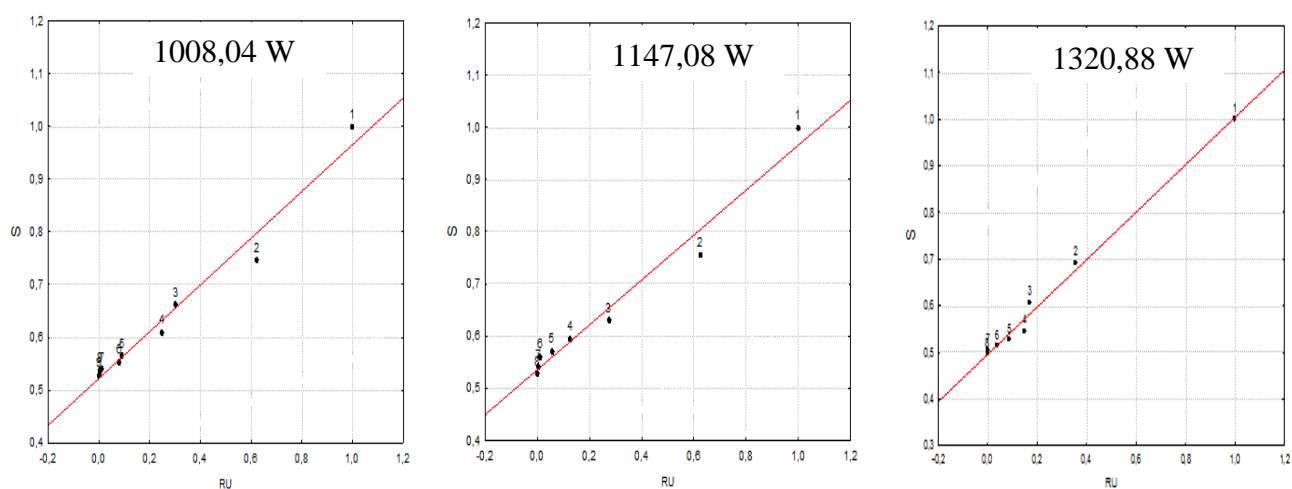
➤ Refractance window

Figura 22- Encolhimento em função da razão de umidade (RU) para a batata doce aplicando o modelo de Lozano em refractance window nas temperaturas de 60, 65 e 70 °C.



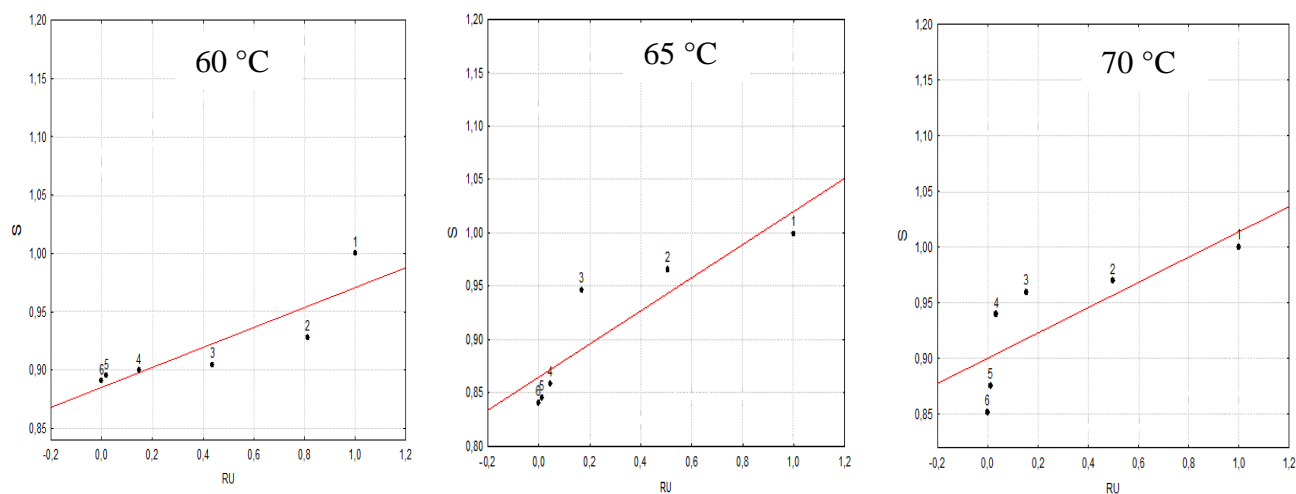
### ➤ Micro-ondas

Figura 23 - Encolhimento em função da razão de umidade (RU) para a batata doce aplicando o modelo de Lozano em micro-ondas nas potências de 1008,04, 1147,08 e 1320,88 W.



### ➤ Termogravimetria (TG)

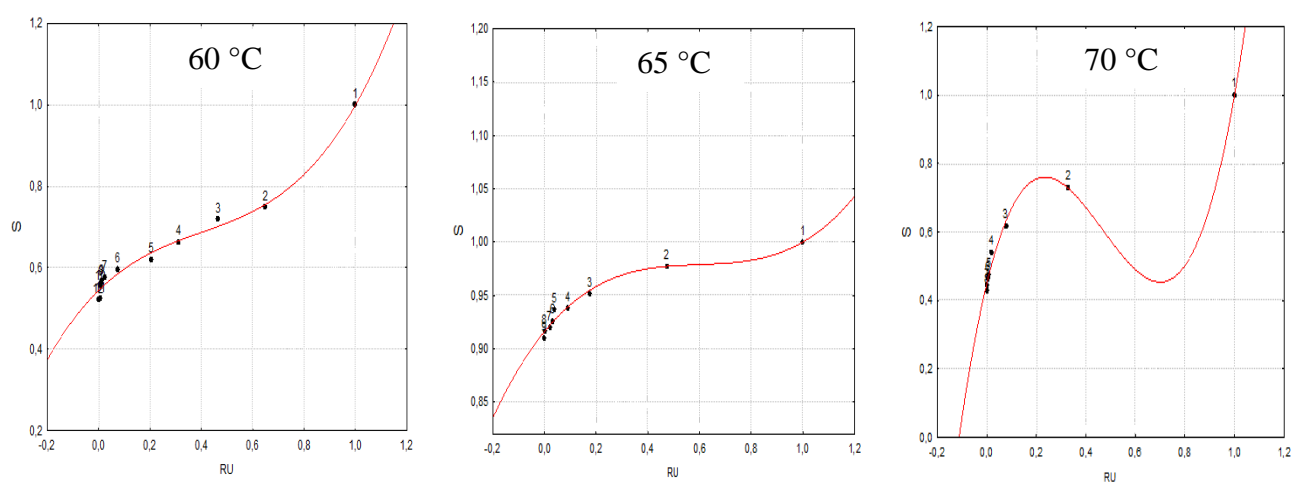
Figura 24 - Encolhimento em função da razão de umidade (RU) para a batata doce aplicando o modelo de Lozano em termogravimetria (TG) nas temperaturas de 60, 65 e 70 °C.



## • MODELO DE RATTI

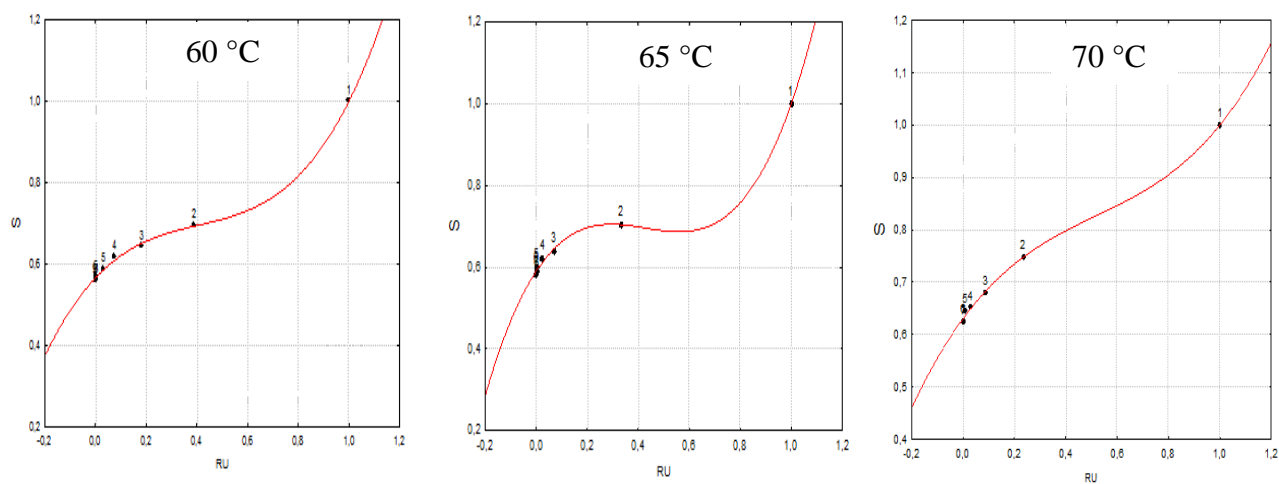
### ➤ Estufa de convecção

Figura 25 - Encolhimento em função da razão de umidade (RU) para a batata doce aplicando o modelo de Ratti em estufa de convecção nas temperaturas de 60, 65 e 70 °C.



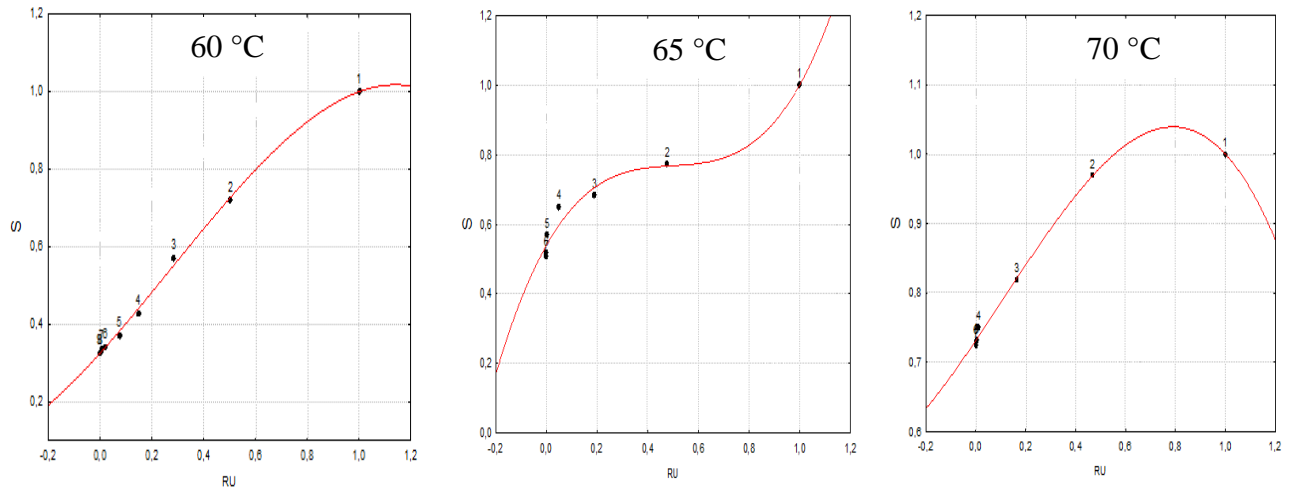
### ➤ Estufa de circulação

Figura 26 - Encolhimento em função da razão de umidade (RU) para a batata doce aplicando o modelo de Ratti em estufa de circulação nas temperaturas de 60, 65 e 70 °C.



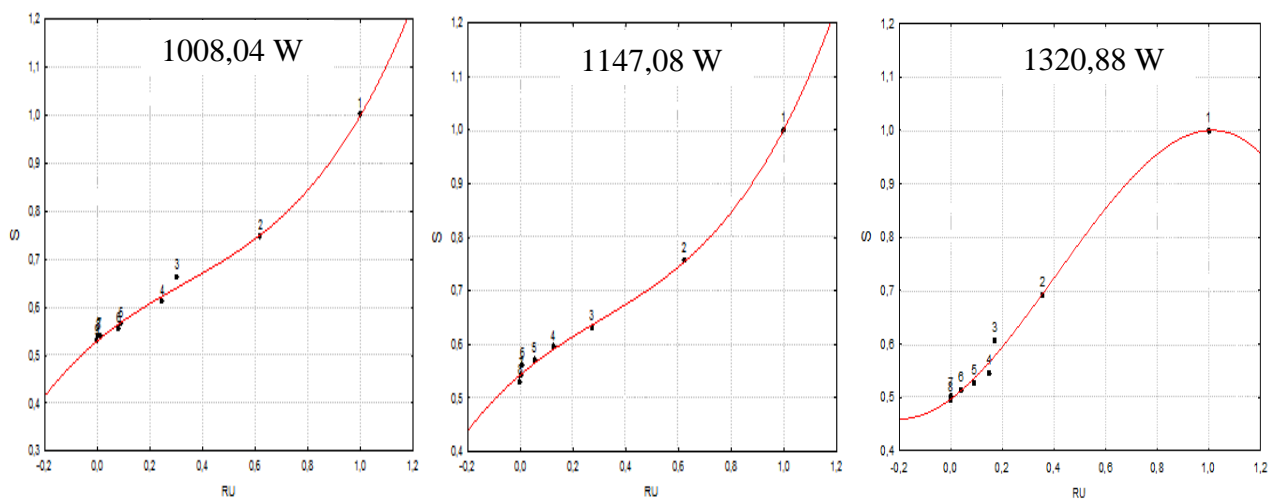
➤ Refractance window

Figura 27 - Encolhimento em função da razão de umidade (RU) para a batata doce aplicando o modelo de Ratti em refractance window nas temperaturas de 60, 65 e 70 °C.



➤ Micro-ondas

Figura 28 - Encolhimento em função da razão de umidade (RU) para a batata doce aplicando o modelo de Ratti em micro-ondas nas potências de 1008,04 W, 1147,08 W e 1320,88 W.





➤ Termogravimetria (TG)

Figura 29 - Encolhimento em função da razão de umidade (RU) para a batata doce aplicando o modelo de Ratti em termogravimetria (TG) nas temperaturas de 60, 65 e 70 °C.

